

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

Vývoj tříkolového zatažitelného podvozku pro malé letadlo

Development of a Retractable Tricycle Landing Gear

Student:

Bc. Karel Linhart

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Květoslav Kaláb, Ph.D.

Ostrava 2009

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vývoj tříkolového zatažitelného podvozku pro malé letadlo

Development of a Retractable Tricycle Landing Gear

Student: Bc. Karel Linhart
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 3909T001-40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Pracoviště: Katedra částí a mechanismů strojů – 347

Zásady pro zpracování:

1. Proved'te přehled používaných způsobů zasouvání podvozků ultralehkých letadel. Proved'te vlastní vývoj tříkolového zatažitelného podvozku.
2. Vyšetřete kinematiku mechanismu zasouvání podvozku. Proved'te kontrolu možných kolizí.
3. Navrhněte a pevnostně zkontrolujte nejdůležitější části podvozku.

Pokyny pro zpracování:

Rozsah práce: cca 60 stran textu mimo přílohy.

Výkres sestavy tříkolového podvozku, dílenský výkres nohy, dílenský výkres součásti upevnění pohonu mechanismu zasouvání.

Seznam doporučené literatury:

- BOLEK, A. KOCHMAN, J. A KOL.: *Části strojů, 1. svazek. Technický průvodce* 8. SNTL Praha, 1989.
- BOLEK, A. KOCHMAN, J. A KOL.: *Části strojů, 2. svazek. Technický průvodce* 8. SNTL Praha, 1990.
- BRÁT, V. ROSENBERG, J. JÁČ, V.: *Kinematika*. SNTL/ALFA Praha, 1987.
- KALÁB, K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře. Části spojovací*. Skripta 1.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1290-8.
- KALÁB, K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře. Části pohonů strojů*. Skripta 1. vyd. VŠB-TU Ostrava, 2008, ISBN 978-80-248-1860-3.
- OLŠANSKÝ, O.: *Konstrukce a výpočet ultralehkých letounů*. Příručka pro amatérské stavitele, Knihnice Letecké amatérské asociace, Praha, 19991.
- UL 2 Požadavky letové způsobilosti SLZ Ultralehké letouny řízené aerodynamicky. Letecká amatérská asociace ČR. Upravené znění, první část, Praha, 2002.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Květoslav Kaláb, Ph.D.

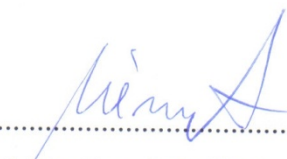
Datum zadání diplomové práce:

21. listopadu 2008

Akademický rok:

2008/2009




.....
prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry


.....
prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Jana Zrzavého 6

79604 Prostějov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LINHART, KAREL Vývoj tříkolového zatažitelného podvozku pro malé letadlo. Ostrava: katedra Částí a mechanismů strojů-347 VŠB-TU, 2009. Diplomová práce, vedoucí: doc. Ing. Kaláb Květoslav, Ph.D., Počet stran: 85

Předmětem této diplomové práce je navrhnout tříkolový zatažitelný podvozek pro konkrétní aplikaci v malém letadle. Práce si klade za úkol navrhnout celkovou koncepci zařízení, kinematiku a systém zatahování podvozkových noh a pevnostně zkontrolovat nejdůležitější součásti. Návrh musí odpovídat legislativním požadavkům platným v ČR.

ANOTATION OF THESIS

LINHART, KAREL Development of a Retractable Tricycle Landing Gear. Ostrava: Department of Machine Parts and Mechanisms 347 VŠB-TU, 2009. Thesis, Head: doc. Ing. Kaláb Květoslav, Ph.D., Number of pages: 85

The subject of this thesis is to design a tricycle landing gear for particular application in a small aircraft. The objective of this thesis is to propose the general conception of the apparatus, the kinematics and the retraction system of the gear legs. Also the basic strength calculations of the most important parts are requested. The design must follow the legislative rules which are valid in ČR.

Obsah:

Seznam použitých značek a zkratk:	9
1 Úvod a cíle diplomové práce	15
2 Cíle diplomové práce	16
3 Popis letounu Atec 321 Faeta	17
3.1 Obecný Popis letounu Atec 321 Faeta	17
3.2 Popis stávajícího provedení pevného podvozku	19
4 Přehled používaných způsobů zasouvání podvozků malých letadel	22
4.1 Rozdělení podle druhu použití	22
4.2 Rozdělení podle konstrukce	22
4.2.1 Systémy hydraulické	22
4.2.2 Systémy elektrické	24
4.2.3 Gravitační vysouvání	24
5. Pozemní zatížení podvozku vnějšími silami	25
5.1 Definice souřadného systému	25
5.2 Výchozí předpisy a podmínky výpočtu	26
5.3 Vstupní hodnoty a základní geometrie podvozku	27
5.4 Výpočet sil působících na kola při stání letadla	28
5.5 Výpočet sil při přistávání letadla	29
5.5.1 Předpoklady pro výpočet sil při přistávání letadla	29
5.5.2 Výpočet sil působících na podvozek při vodorovném přistání na 3 kola	30
5.5.3 Výpočet sil působících na podvozek při vodorovném přistání s příďovým kolem nad zemí	31
5.5.4 Výpočet sil působících na podvozek při přistání s velkým úhlem náběhu	33
5.6 Dodatečné případy pozemního zatížení podle UL 2	35
5.6.1 Boční zatížení kol hlavního podvozku	35
5.6.2 Zatížení kol hlavního podvozku při brždění	36
5.6.3 Zatížení příďového kola působící dozadu	36
5.6.4 Zatížení příďového kola působící dopředu	37
5.6.5 Boční zatížení příďového kola	38
5.7 Vyhodnocení výpočtu pozemního zatížení podvozku	38
6 Návrh hlavního podvozku	39

6.1 Popis konstrukce hlavního podvozku	39
6.2 Pevnostní kontrola hlavního podvozku	41
6.2.1 Zatížení hlavního podvozku	41
6.2.1 Kontrola hlavní podvozkové nohy	41
6.3.3 Kontrola hřídele	45
6.3.4 Kontrola uložení hřídele v podvozkové noze	49
7 Návrh předního podvozku	50
7.1 Kinematika předního podvozku	51
7.2 Konstrukční řešení přední podvozkové nohy	52
7.3 Pevnostní kontrola předního podvozku	53
7.3.1 Zatížení předního podvozku	53
7.3.2 Kontrola vidlice předního kola	56
7.3.3 Kontrola hřídele řízení	58
7.3.4 Kontrola ložisek hřídele řízení	59
8 Návrh pohonu zatahování podvozku	62
8.1 Návrh kinematiky systému zatahování	62
8.2 Zatížení systému zatahování	64
8.2.1 Krouticí momenty od pozemního zatížení	65
8.2.2 Krouticí momenty od tíhy podvozku	66
8.3 Návrh a kontrola ozubeného soukolí zatahování kol	71
8.3.1 Návrh a kontrola ozubeného soukolí pohonu předního podvozku	71
8.3.1 Návrh a kontrola ozubeného soukolí pohonu zadního podvozku	73
8.4 Návrh a kontrola pohybového šroubu a matice pohonu zatahování podvozku	75
8.4.1 Návrh a kontrola závitu šroubu a matice	75
8.4.2 Kontrola pohybového šroubu a matice pohonu zatahování podvozku na vzpěr	77
8.4.3 Kontrola matice a ozubeného hřebene pohonu zatahování podvozku na tah	79
8.5 Návrh elektromotoru pohonu zatahování podvozku	80
9 Závěr	83
Poděkování	83
Seznam použité literatury	84
Použitý software	85
Seznam příloh	85

Seznam použitých značek a zkratek:

	Vzdálenost středu vetknutí hřídele hl. podvozkové nohy	
a_m	od středu roviny souměrnosti hl. kola v ose m	[mm]
	Vzdálenost středu vetknutí hřídele hl. podvozkové nohy	
a_n	od středu roviny souměrnosti hl. kola v ose n	[mm]
	Vzdálenost středu vetknutí hřídele hl. podvozkové nohy	
a_o	od středu roviny souměrnosti hl. kola v ose o	[mm]
	Vzdálenost osy čepu spojení táhla a nohy od osy	
a_{pc}	hlavního čepu přední úpodvozkové nohy	[mm]
a_{pp}	Rameno podpěrné páky podvozku	[mm]
	Vzdálenost těžiště podvozkové nohy od osy čepu	
a_{pt}	spojení táhla a přední podvozkové nohy	[mm]
a_{thn}	Vzdálenost těžiště hlavní podvozkové nohy od osy hřídele	[mm]
b	Výška obdélníkového profilu	[mm]
b_1	Skloněná vzdálenost těžiště - hl. kolo	[mm]
b_{SAT}	Hloubka střední aerodynamické tětiny	[m]
d	Jmenovitý průměr závitu pohybového šroubu	[mm]
D	Velký průměr závitu matice pohybového šroubu	[mm]
d_1	Skloněná vzdálenost kol	[mm]
D_1	Malý průměr závitu matice pohybového šroubu	[mm]
d_2	Střední průměr závitu pohybového šroubu	[mm]
d_3	Malý průměr závitu pohybového šroubu	[mm]
D_b	Vnější průměr matice	[mm]
d_b	Vnitřní průměr matice	[mm]
d_c	Vnitřní průměr šroubu	[mm]
D_J	Vnější průměr hřídele řízení v místě J	[mm]
d_j	Vnitřní průměr hřídele řízení v místě j	[mm]
d_k	Průměr hlavního kola	[mm]
d_l	Průměr hřídele zatahování hl. podvozkové nohy	[mm]
d_{rp}	Průměr roztečné kružnice ozubeného kola zatahování předního podvozku	[mm]

d_{rz}	Průměr roztečné kružnice ozubeného kola zatahování zadního podvozku	[mm]
e	Vůle ve vrcholu závitu pohybového šroubu	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu oceli	[MPa]
e_3	Vzdálenost mezi rad. ložisky přední podvozkové nohy	[mm]
E_j	Modul pružnosti v tahu kompozitu v ose j	[MPa]
E_k	Modul pružnosti v tahu kompozitu v ose k	[MPa]
E_l	Modul pružnosti v tahu kompozitu v ose l	[MPa]
f_3	Vzdálenost spodního rad. ložiska od vidlice předního kola	[mm]
F_b	Boční síla na příďové kolo	[N]
F_{b1}	Vnější boční síla na 1 kolo hlavního podvozku	[N]
F_{b1m}	Boční síla, působící na hlavní kolo při brždění, skloněná do osy m	[N]
F_{b1o}	Boční síla, působící na hlavní kolo při brždění, skloněná do osy o	[N]
F_{b2}	Vnitřní boční síla na 1 kolo hlavního podvozku	[N]
F_{b3}	Vodorovná síla, působící na hlavní kolo při brždění	[N]
F_{b3m}	Vodorovná síla, působící na hlavní kolo při brždění, skloněná do osy m	[N]
F_{b3o}	Vodorovná síla, působící na hlavní kolo při brždění, skloněná do osy o	[N]
F_{b4}	Vodorovná síla, působící na hlavní kolo při doplňkovém zatížení dozadu	[N]
F_{b5}	Vodorovná síla, působící na příďové kolo při doplňkovém zatížení dopředu	[N]
F_{bt}	Boční síla na kola hlavního podvozku, působící v těžišti	[N]
F_c	Celková síla na přední podvozkovou nohu	[N]
F_n	Normálová síla na přední podvozkovou nohu	[N]
F_o	Osová síla na přední podvozkovou nohu	[N]
F_{OD}	Osová síla ve šroubu zatahování zadního podvozku	[N]
F_{OP}	Pohybová osová síla ve šroubu	[N]
F_{OT}	Osová síla ve šroubu zatahování předního podvozku	[N]
F_s	Statiská síla na 1 kolo podvozku při doplňkových zatíženích	[N]
F_{sp}	Statická síla na přední kolo při stání	[N]
F_{st}	Statiská síla na kola hlavního podvozku při stání, působící v těžišti	[N]
F_{sz}	Statická síla na zadní kola při přistání	[N]

F_{xh}	Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku	[N]
	Vodorovná síla, působící na hlavní kolo při přistání na 3 kola, skloněná do osy m	
F_{xhm}		[N]
F_{xp}	Vodorovná složka síly na předové kolo	[N]
F_{xt}	Vodorovná složka síly v těžišti letounu	[N]
F_{yh}	Svislá složka síly na kola hlavního podvozku	[N]
F_{yho}	Vodorovná síla, působící na hlavní kolo při přistání na 3 kola, skloněná do osy o	[N]
F_{yp}	Svislá složka síly na předové kolo	[N]
F_{yt}	Svislá složka síly v těžišti letounu	[N]
f_z	Součinitel smykového tření na závitu	[-]
g	Tíhové zrychlení	[m·s ⁻²]
G_j	Modul pružnosti ve smyku kompozitu v ose j	[MPa]
G_k	Modul pružnosti ve smyku kompozitu v ose k	[MPa]
G_l	Modul pružnosti ve smyku kompozitu v ose l	[MPa]
h	Délka obdélníkového profilu	[mm]
H_1	Nosná hloubka závitu matice pohybového šroubu	[mm]
h_m	Minimální výška matice pohybového šroubu	[mm]
h_s	Shazovací výška	[m]
h_t	Výška těžiště nad osou kol	[mm]
i	Poloměr setrvačnosti průřezu	[mm]
J	Moment setrvačnosti průřezu	[mm ⁴]
K	Součinitel bezpečnosti	[_]
K	Součinitel bezpečnosti	[_]
k_4	Převodní součinitel koutového svaru	[_]
k_A	Koeficient bezpečnosti při tahovém napětí v průřezu A	[_]
k_B	Koeficient bezpečnosti při tahovém napětí v průřezu B	[_]
k_c	Obecný minimální požadovaný součinitel bezpečnosti	[_]
k_k	Zvýšený minimální požadovaný součinitel bezpečnosti	[_]
K_O	Součinitel bezpečnosti ozubeného soukolí	[_]
k_{vz}	Koeficient vzpěrné bezpečnosti	[_]

	Rameno normálové síly na přední podvozkové noze vůči ose	
l_1	hřídele zatahování při přistání na 3 kola	[mm]
	Rameno normálové síly na přední podvozkové noze vůči ose hřídele	
l_4	zatahování při dodatečném zatížení dozadu	[mm]
l_c	Celková délka pro výpočet vzpěru	[mm]
l_l	Délka spoje hřídele zatahování s hl. nohou	[mm]
l_m	Délka matice pro výpočet vzpěru	[mm]
l_o	Délka části s obdélníkovým profilem pro výpočet vzpěru	[mm]
l_{roz}	Rozvor kol	[mm]
l_s	Délka šroubu pro výpočet vzpěru	[mm]
m	Hmotnost letounu	[kg]
M_1	Moment na hlavní podvozkové noze od svislé síly	[N·mm]
M_2	Moment na hlavní podvozkové noze od vodorovné síly	[N·mm]
M_{cel}	Maximální krouticí moment požadovaný po elektromotoru	[N·mm]
m_{hn}	Hmotnost hlavní podvozkové nohy s kolem	[kg]
	Krouticí moment na hřídeli zatahování předního podvozku při	
M_{k1}	přistání na 3 kola	[N·m]
	Krouticí moment na hřídeli zatahování předního podvozku	
M_{k4}	při dodatečném zatížení dozadu	[N·m]
M_{Kh}	Krouticí moment od tíhy hlavní podvozkové nohy	[N·m]
M_{Kp}	Krouticí moment od tíhy přední podvozkové nohy	[N·m]
M_m	Moment, působící na hřídel hlavní podvozkové nohy v ose m	[N·m]
M_n	Moment, působící na hřídel hlavní podvozkové nohy v ose n	[N·m]
M_{OJ}	Ohybový moment na gřídeli řízení v místě J	[N·m]
m_{pn}	Hmotnost přední podvozkové nohy s kolem	[kg]
M_{poh}	Krouticí moment elektromotoru s převodovkou	[N·mm]
M_t	Ohybový moment v bodě dotyku kola	[N·m]
M_{tz}	Třecí moment v závitech pohybového šroubu	[N·mm]
n_d	počet vrstev kompozitu diagonálních (45°) k rovině x-y	[-]
n_j	Provozní násobek podvozku	[-]
n_{min}	Potřebné otáčky elektromotoru	[ot/min]

n_o	počet vrstev kompozitu kolmých rovině x-y	[-]
n_{poh}	Otáčky elektromotoru s převodovkou	[ot/min]
n_{pr}	Provozní násobek zatížení v těžišti	[-]
P	Rozteč závitů pohybového šroubu	[mm]
pc	Přední centráž	[-]
P_{min}	Potřebný výkon elektromotoru	[W]
r	podíl vláken v kompozitu	[%]
R_e	Mez kluzu materiálu	[MPa]
R_{I3}	Reakční síla na hřídeli řízení v bodě I	[N]
R_{J3}	Reakční síla na hřídeli řízení v bodě J	[N]
S	Nosná plocha křídél	[m ²]
s	Vzdálenost roviny souměrnosti hl. kola od podvozkové nohy	[mm]
SAT	Střední aerodynamická těživa	[-]
S_{mat}	Dráha vysunutí matice	[mm]
VOP	Vodorovná ocasní plocha	[-]
V_y	Rychlost klesání	[m·s ⁻¹]
W_{OJ}	Ohybový modul hřídele řízení v místě J	[mm ³]
x_t	Poloha těžiště vůči SAT	[%] b_{SAT}
y_{pn}	Stlačení pneumatiky	[mm]
y_{tl}	Svislý posuv kol při stlačení tlumičů	[mm]
z	minimální počet závitů matice pohybového šroubu	[-]
zc	Zadní centráž	[-]
α	Úhel spojnic středů kol s těžištěm	[°]
β	Úhel nastavení přední podvozkové nohy	[°]
β_s	Koeficient vlivu neznámého krutu na závit pohybového šroubu	[-]
δ	Úhel mezi celkovou silou a přední podvozkovou nohou	[°]
Δl	Deformace pryžových pružin	[mm]
η_{loz}	Účinnost ložisek v sestavě pohonu zatahování podvozku	[-]
η_{pn}	Účinnost tlumení pneumatik	[-]
η_{tl}	Účinnost tlumení tlumičů	[-]

θ	Úhel polohy kompozitu vůči vztažné soustavě.	[°]
λ	Štíhlost sestavy hřebene, matice a šroubu zatahování	[-]
λ_{kr}	Kritická mezí štíhlost	[-]
μ_j	Poissonova konstanta kompozitu v ose j	[-]
μ_k	Poissonova konstanta kompozitu v ose k	[-]
μ_l	Poissonova konstanta kompozitu v ose l	[-]
ρ	Úhel natočení podpěrné páky přední podvozkové nohy	[°]
ρ_c	Hustota uhlíkového kompozitu	[kg·mm ³]
ς	Úhel natočení hlavní podvozkové nohy	[°]
σ_A	Tahové napětí v průřezu A	[MPa]
σ_B	Tahové napětí v průřezu B	[MPa]
σ_{kr}	Kritické napětí ve vzpěru	[MPa]
σ_{mc}	mez pevnosti kompozitu	[MPa]
σ_{me}	mez pevnosti epoxidové pryskyřice	[MPa]
σ_{mn}	Maximální vypočtené napětí na hlavní podvozkové noze	[MPa]
σ_{mu}	mez pevnosti uhlíkového vlákna	[MPa]
σ_{OJ}	Ohybové napětí na hřídeli řízení v místě J	[MPa]
σ_S	Napětí v sestavě zatahování	[MPa]
σ_u	Mez úměrnosti materiálu	[MPa]
τ_0	Smykové napětí osově ve spoji hřídele s hl. podvozkovou nohou	[MPa]
τ_c	Smykové napětí celkové ve spoji hřídele s hl. podvozkovou nohou	[MPa]
τ_{D2}	Pevnost ve stříhu lepidla	[MPa]
τ_k	Smykové napětí krutové ve spoji hřídele s hl. podvozkovou nohou	[MPa]
ϕ_1	Úhel nastavení kořenové tětiny k ose trupu	[°]
χ	Úhel natočení přední podvozkové nohy	[°]

1 Úvod a cíle diplomové práce

Ultralehká letadla jsou podle legislativy platné v ČR sportovní létající zařízení. Jak napovídá název, jsou tato letadla obvykle využívána ke sportovnímu a rekreačnímu létání. Česká republika patří k největším výrobcům ultralehkých letadel na světě, přičemž naprostá většina produkce směřuje na export zejména do USA a zemí EU.

V počátcích vzniku této kategorie „létajících aparátů“ bylo každé jednotlivé letadlo obvykle individuální konstrukcí svého tvůrce a vznikalo v improvizovaných podmínkách. Postupem doby ale vzrostl zájem o malá letadla této kategorie a tak začaly vznikat podniky produkující tato letadla v malých sériích a také podniky, které se již dříve zabývaly všeobecným letectvím zařadily tato letadla do svých výrobních programů. Sériová výroba a zázemí větších podniků umožnily navrhovat a stavět ultralehká letadla tak, že se technickou úrovní často dají srovnat s „dospělými“ letadly.

Ultralehká letadla jsou tak dnes schopná uspokojit potřeby náročných zákazníků, kteří si stroj této kategorie pořizují s rozsáhlým avionickým vybavením, vyžadují maximální pohodlí v kokpitu a samozřejmě vysoké letové výkony při přijatelných provozních nákladech.

Jedním z prostředků jak zvýšit letové výkony a zároveň snížit spotřebu pohonných hmot letadla je použití zatažitelného podvozku. Aplikace zatažitelného podvozku na ultralehkých letadlech není příliš rozšířená, přesto několik takových konstrukcí již úspěšně létá.

Diplomová práce se zabývá návrhem tříkolového zatažitelného podvozku ultralehkého letadla Atec 321 Faeta, který musí odpovídat legislativním požadavkům platným v ČR.

2 Cíle diplomové práce

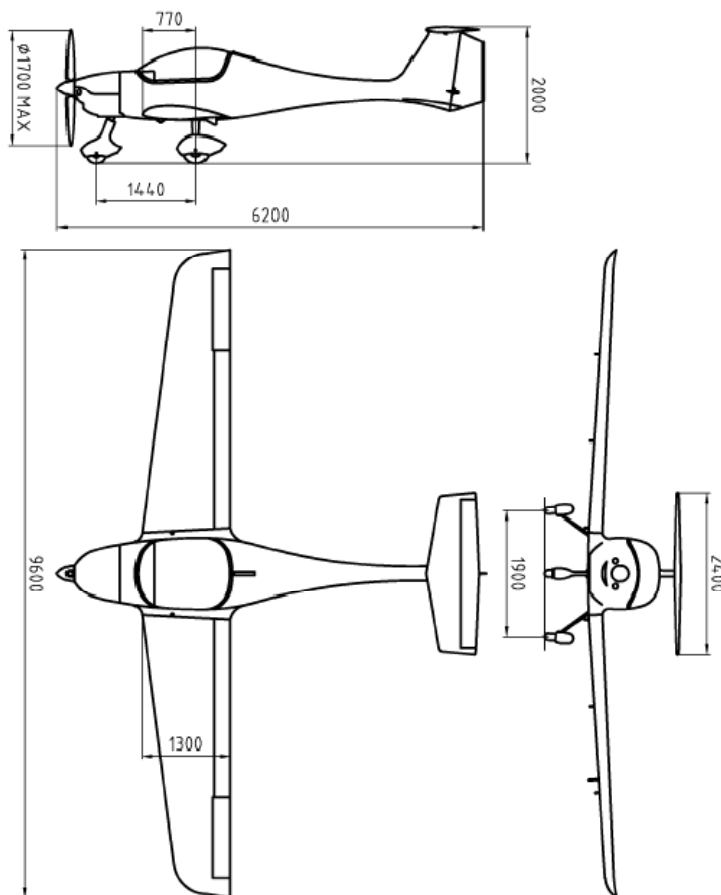
S ohledem na splnění zadání byly vytýčeny následující dílčí cíle:

- a) Provést popis letadla Atec 321 Faeta, zejména provedení pevného podvozku.
- b) Vyšetřit používané způsoby zasouvání podvozků malých letadel
- c) Stanovit zatížení podvozku
- d) Provést konstrukční návrh a příslušné pevnostní kontroly zatažitelného hlavního podvozku.
- e) Provést konstrukční návrh a příslušné pevnostní kontroly zatažitelného předního podvozku.
- f) Provést návrh pohonů zatahování podvozku.

3 Popis letounu Atec 321 Faeta

3.1 Obecný Popis letounu Atec 321 Faeta

Ultralehký letoun (sportovní létající zařízení) Atec 321 Faeta je dvoumístný dolnoplošník s pohonem v tažném uspořádání. Konstrukce trupu je celokompozitová poloskořepina z uhlíkových vláken, vyztužená přepážkami z uhlíku, kevlaru a překližky. Ocasní plochy mají tvar lichoběžníku a jsou uspořádány do tvaru „T“. Kýlová stabilizační plocha je integrální částí skořepiny trupu. Křídlo tvaru lichoběžníka s úhlem šípu $5,5^\circ$. Vnější skořepinový obal z uhlíkového sendviče je nesen vrstveným dřevěným nosníkem, syceným pryskyřicí. Křídlo je vybaveno šterbinovou vztlakovou klapkou, která může být ovládána elektricky. Letoun je poháněn motorem Rotax 912, který je pomocí motorového lože z CrMo trubek připevněn k motorové protipožární přepážce. Třípohledový náčrt je na obr. 3.1. technická data jsou uvedena v tab. 3.1.



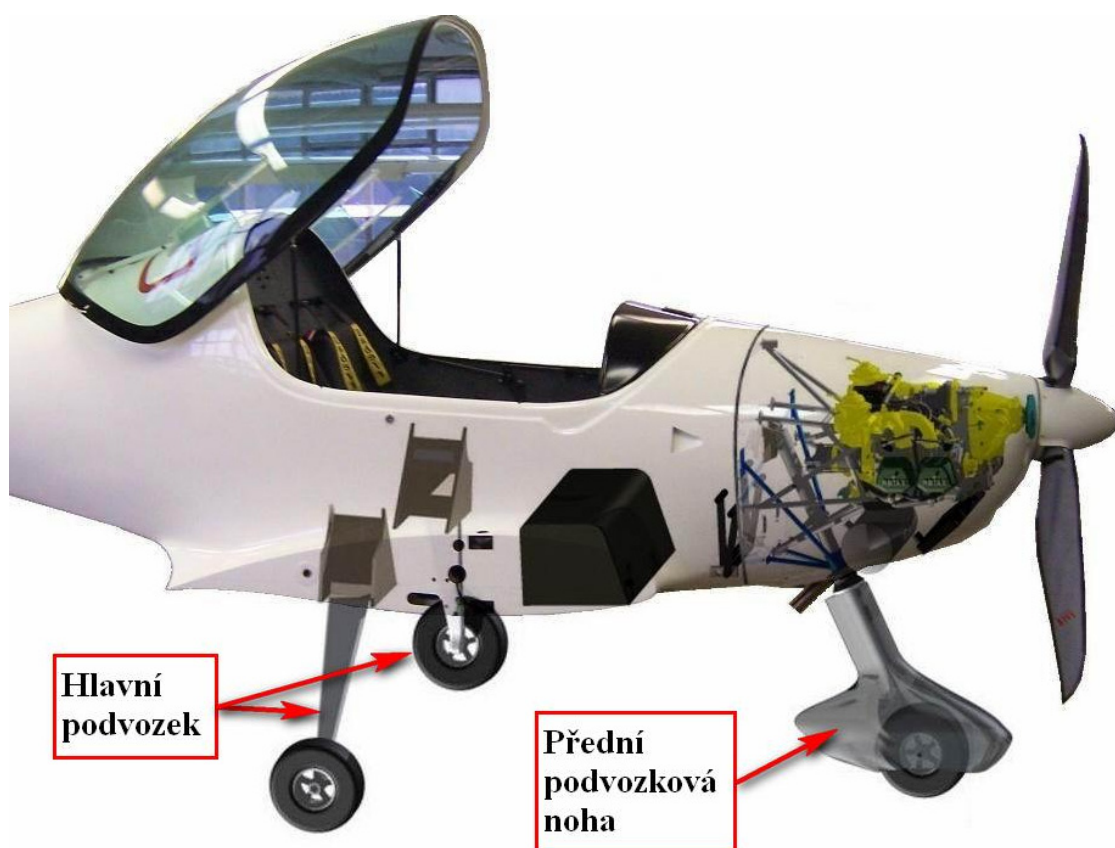
Obr. 3.1 Třípohledový náčrt letounu Atec 321 Faeta [1]

Tab. 3.1 Základní technická data letounu Atec 321 Faeta [1]

Rozměry		Pohonná jednotka			
Rozpětí křídla	9,6 [m]	Rotax 912 UL		Rotax 912 ULS	
Délka trupu	6,2 [m]	Výkon vzletový	59,6 [kW] při 5800 [ot/min]	Výkon vzletový	73,5 [kW] při 5800 [ot/min]
Celková výška	2,0 [m]	Výkon maximální trvalý	58,0 [kW] při 5500 [ot/min]	Výkon maximální trvalý	69,0 [kW] při 5500 [ot/min]
Plocha křídla	10,1 [m ²]	Výkon cestovní	37,7 [kW] při 4800 [ot/min]	Výkon cestovní	44,6 [kW] při 4800 [ot/min]
Hloubka SAT	1,11 [m]	Výkony (Rotax 912 ULS, 450 kg)			
Rozpětí VOP	2,4 [m]	Užitečné zatížení		172 [kg]	
Hmotnosti		Provozní násobky		+4/ -2 [g]	
		Min. rychlost s klapkami		52 [km/h]	
		Min. rychlost bez klapek		64 [km/h]	
		Cestovní rychlost		227 [km/h]	
Prázdná	278 [kg]	Max. rychlost horizont		270 [km/h]	
Maximální vzletová	450 [kg]	Nepřekročitelná rychlost V _{NE}		290 [km/h]	
Maximální vzletová s integrovaným záchranným systémem	472,5 [kg]	Stoupavost		7 [m/s]	
Maximální hmotnost zavazadel v zavazadlovém prostoru	5 [kg]	Spotřeba paliva (140/180 km/h)		7/12 [l/h]	

3.2 Popis stávajícího provedení pevného podvozku

Stávající provedení letadla Atec 321 Faeta je vybaveno pevným tříkolovým podvozkem příďového typu (obr.3.2). Všechna kola jsou aerodynamicky kapotována. Základní technická data podvozku jsou uvedena v Tab. 3.2 [1].



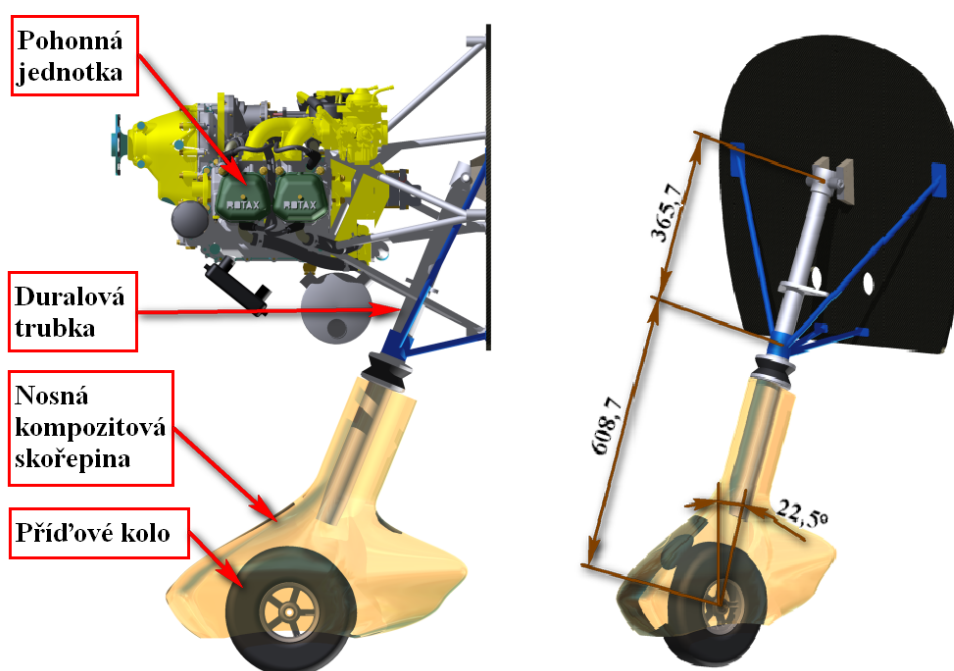
Obr. 3.2 Pevný tříkolový podvozek

Tab. 3.2 Základní technická data podvozku [1]

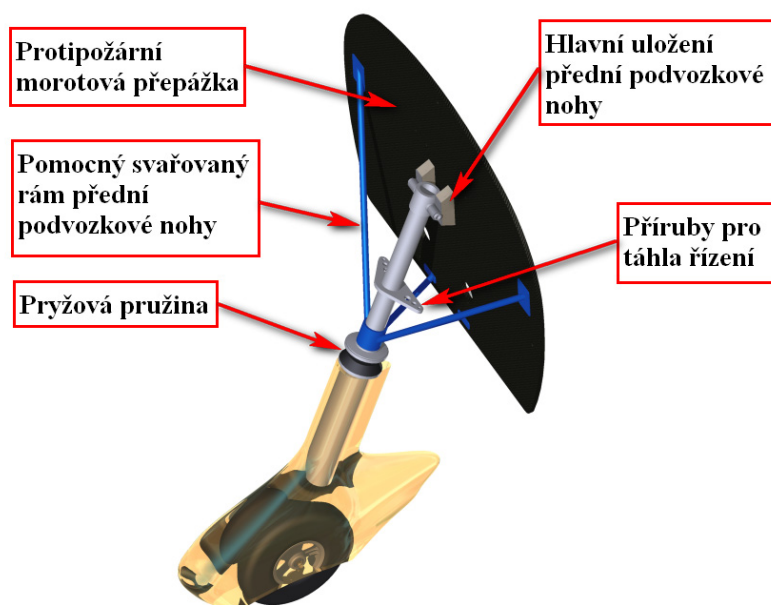
Rozchod	1,9 [m]	
Rozvor	1,4 [m]	
	Hlavní podvozek	Příďový podvozek
Rozměr pneumatik	350 x 120 [mm]	300 x 100 [mm]
Tlak pneumatik	0,16 Mpa	0,16 Mpa
Odpružení	Laminátová pružina	Pryžová pružina
Brzdy	Hydraulické kotoučové	Nebržděno

a) Popis přední podvozkové nohy

Řiditelná předířová noha (obr. 3.3) je tvořena duralovou trubkou a nosnou kompozitovou skořepinou, ve které je zalaminovaná vidlice kola a tvoří s ní jeden tuhý celek. Odpružení je zajištěno gumovou pružinou. Noha je v hlavním uložení přišroubovaná na motorovou přepážku přes dřevěné bloky, kde jsou zachycovány osové síly v noze. Pomocný svařovaný rám z L-CM3 trubek zachycuje ohybové momenty (obr. 3.4). Předířové kolo od fy Kašpar má rozměry 300x100 mm.



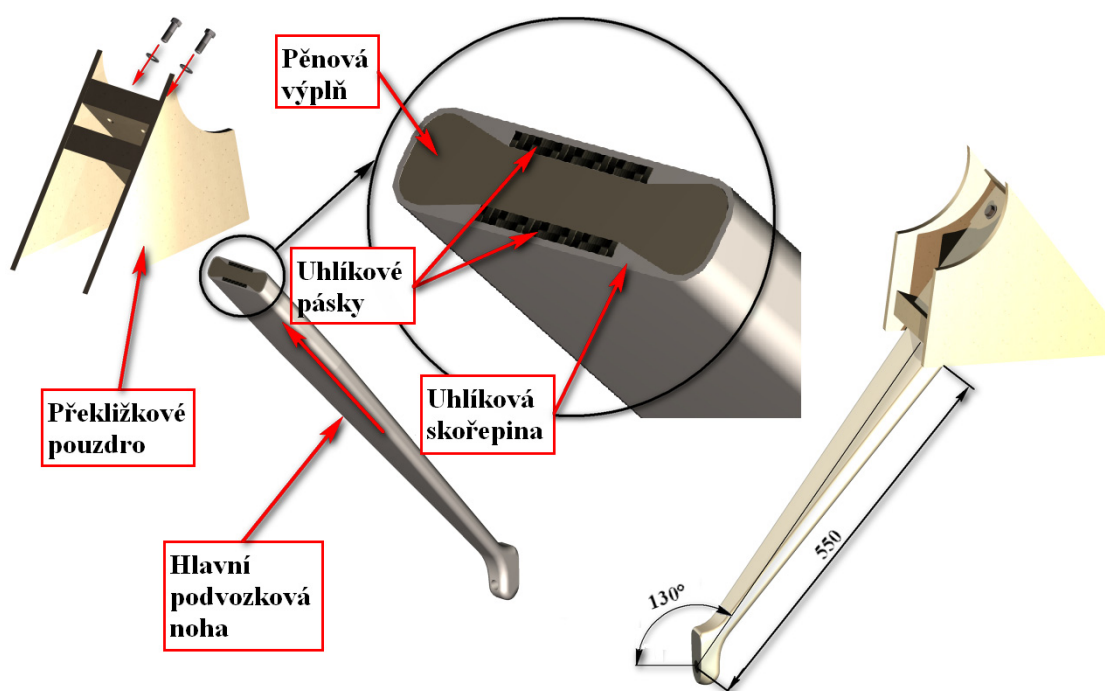
Obr. 3.3 Přední podvozková noha poloha a rozměry



Obr. 3.4 Uložení přední podvozkové nohy

b) Popis hlavní podvozkové nohy

Hlavní podvozkové nohy jsou řešeny jako kompozitové pružnice. Jedná se o výrobek firmy Comlet. Materiálem je uhlíkový kompozit sycený epoxidem. Každá noha je tvořena dvěma polovinami skořepiny, které jsou spojeny uhlíkovým páskem. Dutiny jsou vyplněny epoxidovou pěnou (obr. 3.5). Nohy jsou zasazeny do překližkových pouzder, které jsou zašroubovány a zalaminovány do trupu letadla po bocích pilotní kabiny.



Obr. 3.5 Konstrukce hlavního podvozku

Kola hlavního podvozku od fy Kašpar o rozměrech 350x120 mm jsou vybavena hydraulicky ovládanými kotoučovými brzdami (obr. 3.6).



Obr. 3.6 Kolo hlavního podvozku s brzdou

4 Přehled používaných způsobů zasouvání podvozků malých letadel

Přestože možnost zatahování přistávacího zařízení není u ultralehkých letadel nijak rozšířená, existuje a v praxi se používá více způsobů zatahování. Tyto způsoby jsou v podstatě shodné jako u větších kategorií letadel.

Způsoby zasouvání přistávacího zařízení můžeme rozdělit buďto podle druhu použití nebo podle konstrukčního provedení.

4.1 Rozdělení podle druhu použití

Podle druhu použití se jedná zejména o vytažení zasunutého přistávacího zařízení. Rozlišujeme běžný provozní způsob vysunutí a nouzový způsob vysunutí pro případ závady. Rychlý a na činnosti pohonné jednotky nezávislý nouzový způsob vysunutí je u ultralehkých letadel obzvlášť důležitý, protože tato letadla bývají provozována v malých výškách a mohou používat k letecké činnosti necertifikované motory. Je tedy nutno počítat s případem nouzového přistání z důvodu vysazení motoru. Záložním způsob předpokládá narozdíl od provozního způsobu pouze vysunutí podvozku, není určen k opětovnému zasunutí podvozku, i když by to u některých konstrukcí bylo proveditelné.

4.2 Rozdělení podle konstrukce

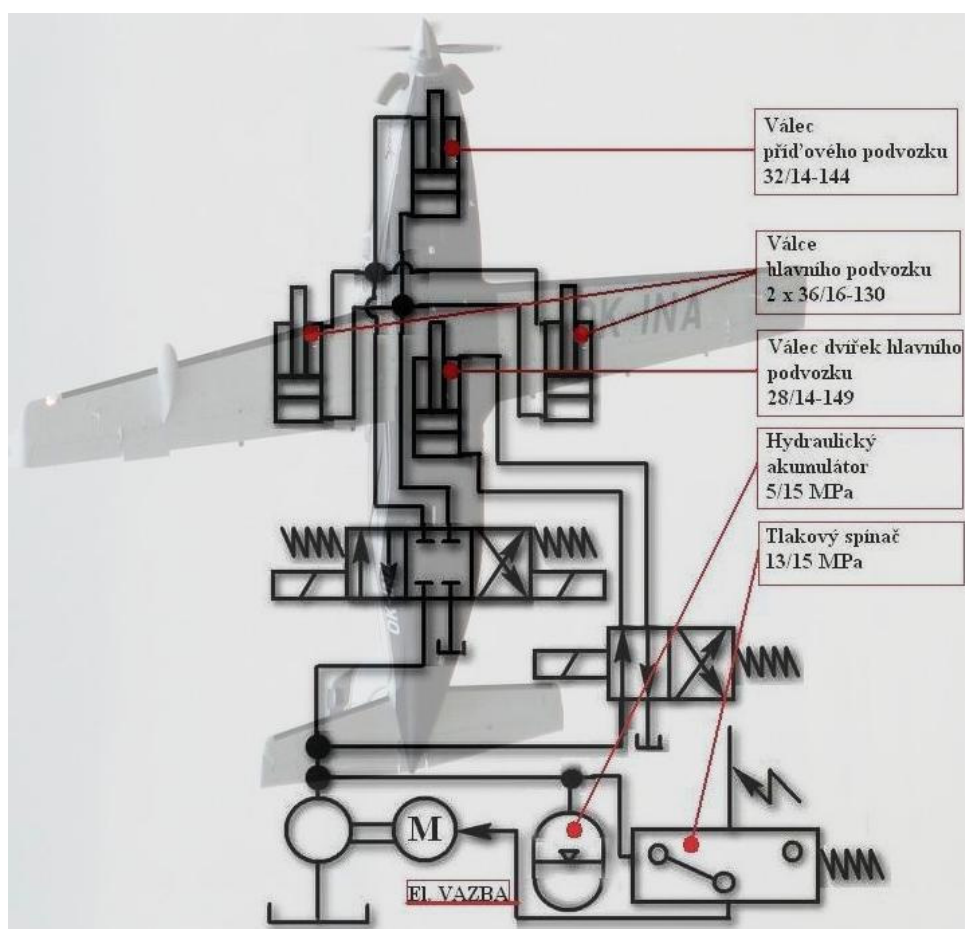
4.2.1 Systémy hydraulické

Mechanismus podvozku je ovládán přímočarými hydromotory (tzv. válci). Každá podvozková noha má obvykle svůj vlastní válec. Zdrojem tlakové tekutiny pro provoz válců je hydraulické čerpadlo, které je poháněno buďto přímo motorem letadla přes redukční převodovku, nebo je poháněno elektricky. Výhodou je možnost zkrácení vedení tlakové kapaliny pomocí umístění elektromotoru blíže k pracovním válcům a možnost izolace tlakového vedení od vibrací pohonné jednotky. Systém je někdy doplněn hydraulickými akumulátory. Ukázkové schéma znázorňuje obr. 4.1 [2]. Pro nouzové vysunutí je obvykle do systému zařazena ruční hydraulická pumpa. Tento způsob ovládání

je obvyklý u velkých a rychlých letadel, kde jsou nutné velké síly v ovládacích mechanismech.

Nevýhodou je dlouhé vedení tlakového potrubí a hadic od zdroje (čerpadla) k pracovním válcům. Toto vedení má nezanedbatelnou hmotnost a je náchylné k poškození např. vibracemi. Jeho použití pouze pro ovládání jednoho mechanismu by bylo neefektivní, proto hydraulický okruh ovládá obvykle více funkcí (křídélka, klapky, sloty atd.). Další nevýhodou je trvalá práce čerpadla, které odebírá část výkonu pohonné jednotky, i když systém podvozku není v činnosti (platí pro čerpadla poháněná přímo motorem letadla). Pokud je použito elektricky poháněné čerpadlo, pak jsou kladeny větší nároky na elektrickou výzbroj letadla. Přítomnost dalšího prvku-elektromotoru navíc zvyšuje riziko závady systému.

Výhodou je rozsáhlá standartizace hydraulických systémů, od čerpadla (např. motory Rotax mají standardně přírubu na připojení různých druhů čerpadel), přes rozvaděče až po hydromotory. Příkladem použití takového systému v ul. letadle je typ KP 2U SOVA. U tohoto letadla je hydraulický okruh využitý také k ovládání mechanizace křídla.



Obr. 4.1 Schéma návrhu hydraulického systému podvozku letadla AE 270

4.2.2 Systémy elektrické

V případě čistě elektrického způsobu ovládání je mechanismus zasouvání podvozku spojen přímo s elektromotorem nebo servomechanismem. Odpadá tedy jakékoliv hydraulické vedení a rozvaděče. Elektromotor pracuje pouze, pokud je toho třeba. Nevýhodou je opět zvýšené zatížení elektrické soustavy v letadle, tedy nutnost použití akumulátoru o větší kapacitě a silnějšího alternátoru. Tento systém bývá obvykle použit v kombinaci s elektrickým ovládáním mechanizace křídla, kde je posílená elektrická výzbroj dále efektivně využita. Příkladem jsou např. výkonná ul. letadla TL 2000 Sting, nebo D4 BK Fascination (obr. 4.3).



Obr. 4.3 Kontrola podvozku letadla D4 BK Fascination [3]

4.2.3 Gravitační vysouvání

Gravitační vysouvání podvozku je velmi efektivní záložní způsob. Podvozek se v tomto případě vysune pomocí působení vlastní hmotnosti po uvolnění zámků v poloze „zasunuto“. Výhodou je konstrukční jednoduchost, rychlost vysunutí a nezávislost na funkci systémů letadla. Jedinou podmínkou pro správnou funkci je zaujetí správné přistávací polohy letadla.

5. Pozemní zatížení podvozku vnějšími silami

5.1 Definice souřadného systému

Pokud nebude uvedeno jinak, platí v celé diplomové práci základní souřadný systém podle Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Definice souřadného systému

5.2 Výchozí předpisy a podmínky výpočtu

Postup výpočtu zatížení a nároky na pevnost podvozku ultralehkých letadel stanovuje předpis UL 2 [4]. Tento předpis vychází z amerického předpisu FAR 23, který platí pro letadla vyšší kategorie. Postup výpočtu zohledňuje provozní podmínky ultralehkých letadel a zaručuje bezpečnost za jakýchkoliv podmínek provozu letadla.

Vstupní parametry pro výpočet jsou převzaty z Letové a provozní příručky pro letadlo Atec 321 Faeta [1]. Celý výpočet je proveden pro maximální vzletovou hmotnost letadla. Výpočet je proveden pro rozsah centráže 24-39% b_{SAT} , přestože příručka [1] stanoví povolený rozsah 27-36% b_{SAT} . Tímto je vytvořena rezerva pro případnou změnu polohy těžiště letadla v důsledku konstrukčních změn, jejichž vliv se nedá dopředu přesně stanovit.

Dotykové body kol jsou předpokládány ve stejné poloze, jako u původního pevného podvozku. Pro výhodné zkrácení délky přední podvozkové nohy by bylo třeba přední dotyk posunout dozadu, zde je ale omezující podmínka nejmenšího úhlu α , který svírá trojúhelník, tvořený dotyky kol a těžištěm letadla. Tento úhel by měl být větší, než 60° [5], přičemž už původní návrh jej plní s minimální rezervou. Pokud by se posunul dozadu i zadní dotykový bod, úhel α by sice zůstal zachován, ale hmotnost podvozku posunutého dozadu by již značně ovlivnila polohu těžiště letadla a zadní podvozkové nohy by byly neúměrně vysoce zatíženy.

5.3 Vstupní hodnoty a základní geometrie podvozku

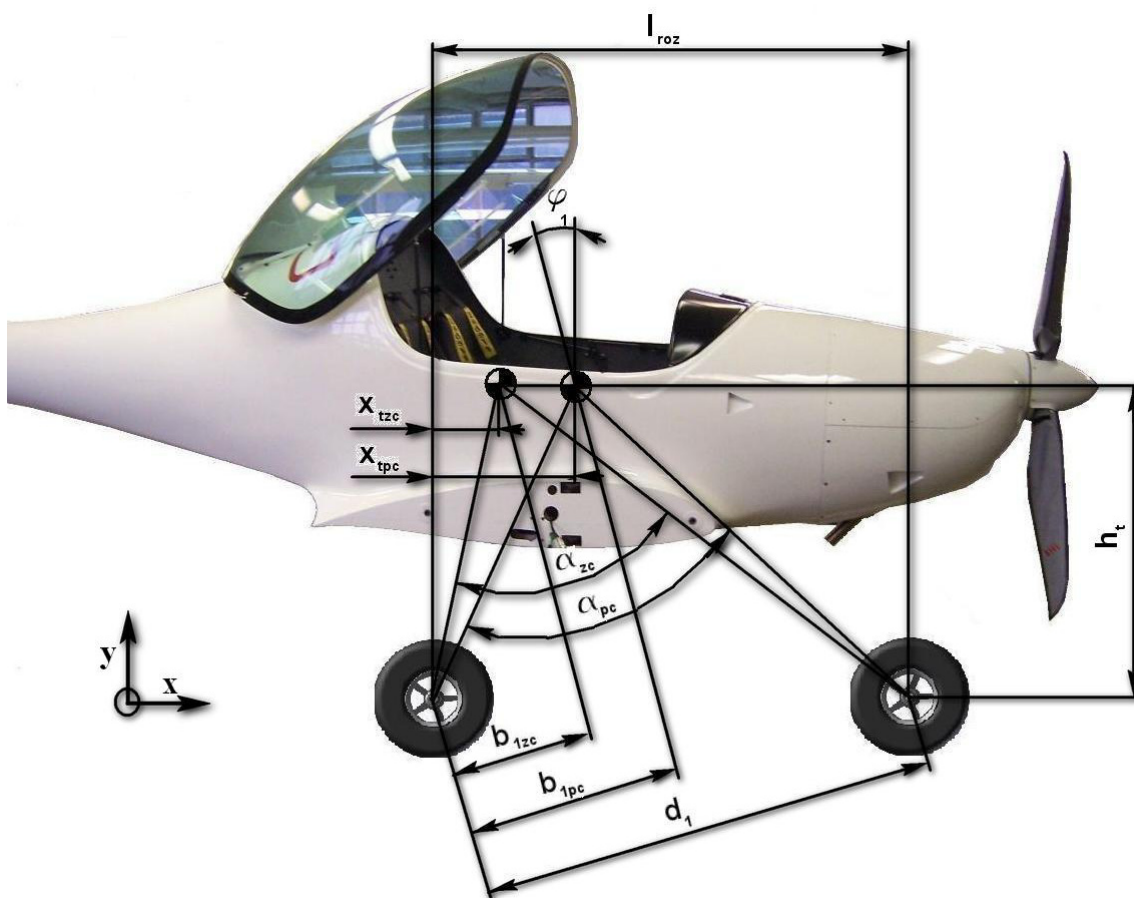
Vstupní hodnoty uvádí tab. 5.1 a tab. 5.2, geometrie podvozku je zobrazena na obr. 5.1.

Tab. 5.1 Vstupní konstanty

Tíhové zrychlení $g[m.s^{-2}]$	9,81
Hmotnost letounu $m[kg]$	472,5
Nosná plocha křidel $S[m^2]$	10,1
stlačení pneumatiky $y_{pn}[mm]$	75
předpokládaný svislý posuv kol při stlačení tlumičů $y_{tl}[mm]$	50
Účinnost tlumení pneumatik η_{pn}	0,5
Účinnost tlumení tlumičů η_{tl}	0,5

Tab. 5.2 Geometrie podvozku

rozvor kol $l_{roz}[mm]$	1440	
výška těžiště nad osou kol $h_t[mm]$	956	
centráž x_t	Přední pc	Zadní zc
$x_t[\%] \ b_{SAT}$	24	39
$x_t[mm]$	315,1	148,3
$d_1[mm]$	1404,3	1404,3
$b_1[mm]$	544,1	382,3
$\alpha[^\circ]$	67,9	63,5
$\varphi_1 = \arctg(0,25) = 14^\circ$ dle [UL2]		



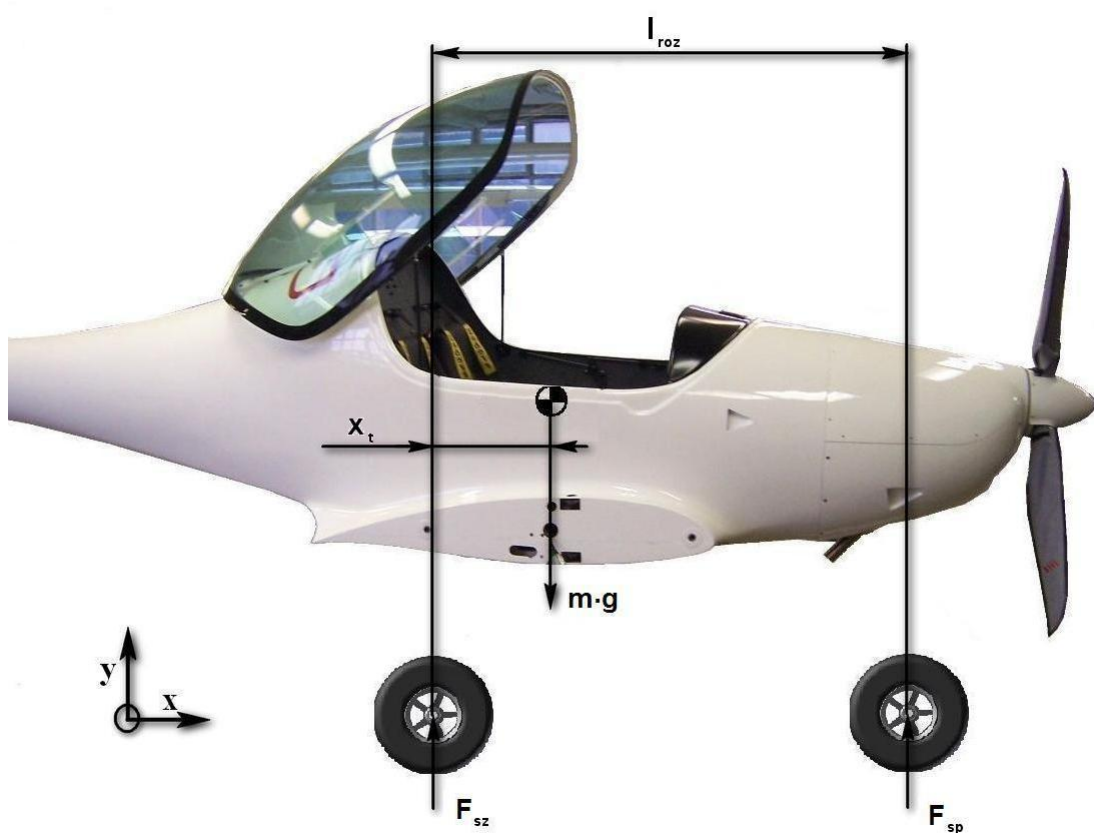
Obr. 5.1 Geometrie Podvozku

5.4 Výpočet sil působících na kola při stání letadla

Výpočet sil je proveden pro krajní polohy těžiště při maximální přední a zadní centráži podle obr. 5.2 a podle následujících vztahů.

$$F_{sz} = \frac{(l_{roz} - x_t) \cdot m \cdot g}{L_{roz}} \quad (5.1)$$

$$F_{sp} = m \cdot g - R_{sz} \quad (5.2)$$



Obr. 5.2 Statické síly působící na kola podvozku

Síly a hodnoty jsou shrnuty v tab. 5.3.

Tab. 5.3 Statické síly na kola při stání

m[kg]	x_t[%] b_{SAT}	x_t[m]	l_{roz}[m]	F_{sp} [N]	F_{sz} [N]
472,5	24	0,315	1,44	1014	3621
472,5	39	0,148	1,44	477	4158

5.5 Výpočet sil při přistávání letadla

Přistávání letadla je provozní pozemní zatížení. Je tvořeno vnějším zatížením a setrvačnými silami, které působí na konstrukci letounu v okamžiku dosednutí na zem při přistání. Předpis UL 2 vyžaduje vypočítat síly na podvozek pro 3 základní způsoby přistání a dále předepisuje výpočet sil pro přídavná pozemní zatížení.

5.5.1 Předpoklady pro výpočet sil při přistávání letadla

Provozní násobek, působící v těžišti vychází z hodnoty klesací rychlosti V_y . Provozní násobek je také definován jako poměr maximálního zatížení předpokládaného normami ku statickému zatížení v těžišti letadla. V průběhu nárazu se v těžišti letounu předpokládá vztlačová síla odpovídající 2/3 hmotnosti letadla.

Rychlost klesání V_y :

$$V_y = 0,51 \cdot \sqrt[4]{\frac{m \cdot g}{S}} = 0,51 \cdot \sqrt[4]{\frac{472,5 \cdot 9,81}{10,1}} = 2,36 \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.3)$$

$$\text{podmínka: } 3 < V_y > 1,5 \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.4)$$

Provozní násobek zatížení v těžišti n_{pr} :

$$n_j = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot g}{S}} + \frac{y_{pn} + y_{tl}}{3}}{\eta_{pn} \cdot y_{pn} + \eta_{tl} \cdot y_{tl}} = \frac{0,0132 \cdot \sqrt{\frac{472,5 \cdot 9,81}{10,1}} + \frac{0,075 + 0,05}{3}}{0,5 \cdot 0,075 + 0,5 \cdot 0,05} = 5,99 [-] \quad (5.5)$$

$$n_{pr} = n_j + 0,067 = 5,99 + 0,067 = 6,06 [-] \quad (5.6)$$

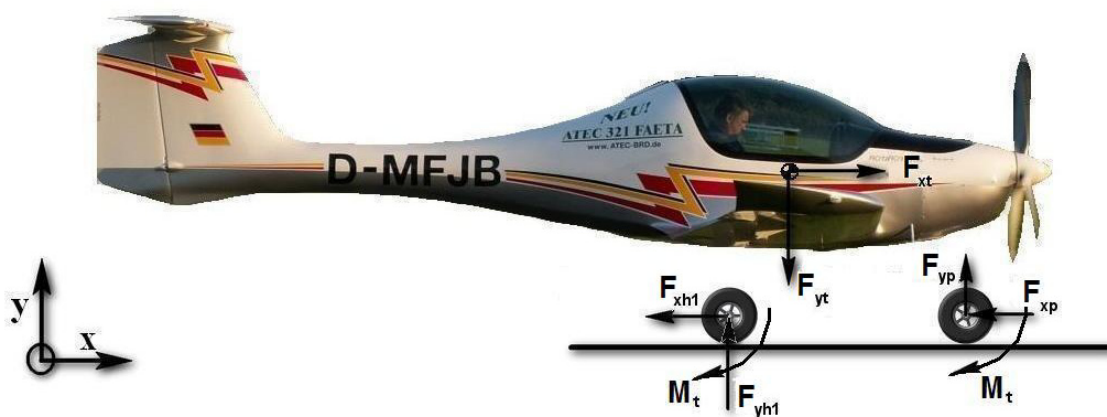
Podvozek musí pro schválení uspět ve shazovací zkoušce, kdy se letoun zvedne do určité výšky h_s , ze které spadne volným pádem na zem.

Shazovací výška h_s :

$$h_s = \frac{V_y^2}{2 \cdot g} = \frac{2,36^2}{2 \cdot 9,81} = 0,284 [\text{m}] \quad (5.7)$$

5.5.2 Výpočet sil působících na podvozek při vodorovném přistání na 3 kola

Stav letadla při vodorovném přistání na 3 kola ukazuje obr. 5.3. Momenty vzniklé posunutím sil do os kol výpočet nezahrnuje.



Obr. 5.3 Přistání letadla na tři kola

Svislá složka síly v těžišti letounu:

$$F_{yt} = n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (5.8)$$

Vodorovná složka síly v těžišti letounu:

$$F_{xt} = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (5.9)$$

Svislá složka síly na kola hlavního podvozku:

$$F_{yh1} = (n_{pr} - 0,667) \cdot m \cdot g \cdot \frac{d_1 - b_1}{d_1} \quad (5.10)$$

Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku:

$$F_{xh1} = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot m \cdot g \cdot \frac{d_1 - b_1}{d_1} \quad (5.11)$$

Svislá složka síly na příďové kolo:

$$F_{yp} = (n_{pr} - 0,667) \cdot m \cdot g \cdot \frac{d_1 - b_1}{d_1} \quad (5.12)$$

Vodorovná složka síly na příďové kolo:

$$F_{xp} = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot m \cdot g \cdot \frac{d_1 - b_1}{d_1} \quad (5.13)$$

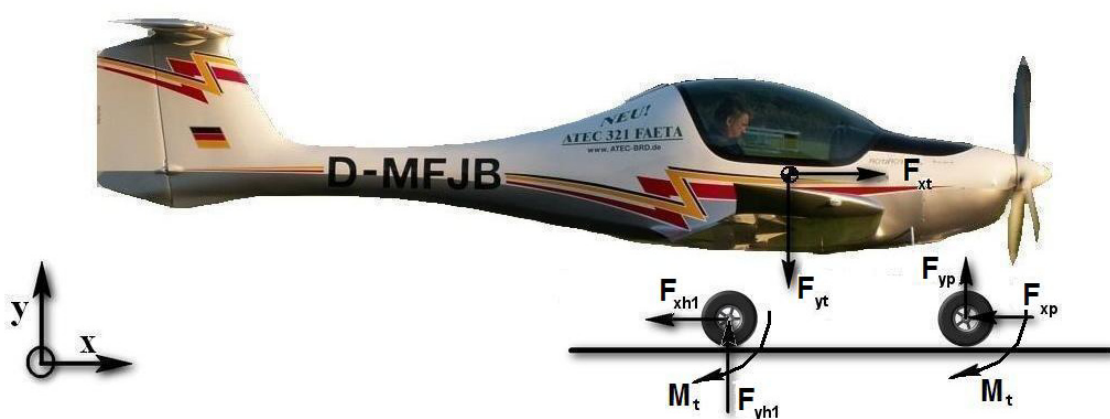
Výsledky výpočtů sil pro maximální přední a zadní centráž zobrazuje tab. 5.4.

Tab. 5.4 Výsledné síly na podvozek při vodorovném přistání na 3 kola

Výsledné síly	Centráž	
	Přední 24 [%]	Zadní 39 [%] b_{SAT}
	b_{SAT}	
	[N]	[N]
F_{yt}	28081	28081
F_{xt}	7020	7020
F_{yh1}	15307	18187
F_{xh1}	4300	5109
F_{yp}	9682	6802
F_{xp}	2720	1911

5.5.3 Výpočet sil působících na podvozek při vodorovném přistání s příďovým kolem nad zemí

Stav letadla při vodorovném přistání s příďovým kolem nad zemí ukazuje obr. 5.4. Momenty vzniklé posunutím sil do os kol výpočet nezahrnuje.



Obr. 5.4 Vodorovné přistání letadla s příďovým kolem nad zemí

Svislá složka síly v těžišti letounu:

$$F_{yt} = n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (5.14)$$

Vodorovná složka síly v těžišti letounu:

$$F_{xt} = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (5.15)$$

Svislá složka síly na kola hlavního podvozku:

$$F_{yh2} = (n_{pr} - 0,667) \cdot m \cdot g \quad (5.16)$$

Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku:

$$F_{xh2} = 0,25 \cdot n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (5.17)$$

Svislá složka síly na příďové kolo:

$$F_{yp} = 0 \quad (5.18)$$

Vodorovná složka síly na příďové kolo:

$$F_{xp} = 0 \quad (5.19)$$

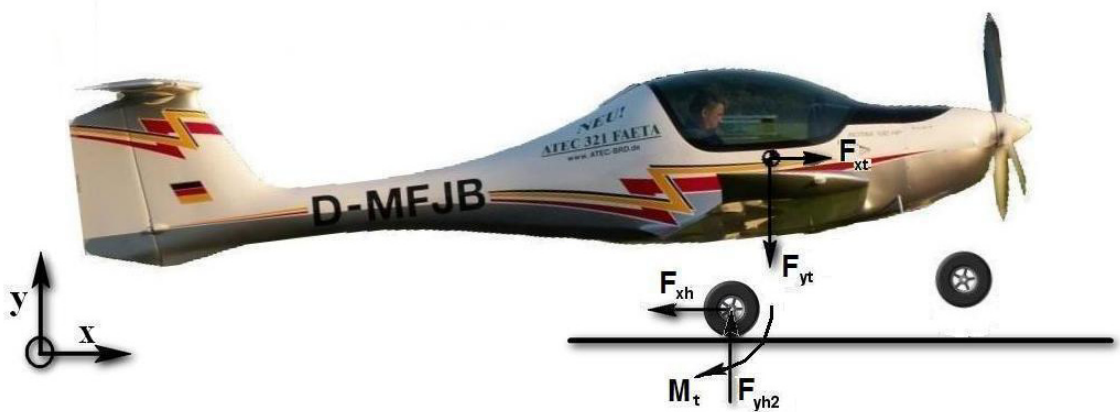
Výsledky výpočtů sil pro maximální přední a zadní centráž zobrazuje tab. 5.5.

Tab. 5.5 Výsledné síly na podvozek při vodorovném přistání s
příďovým kolem nad zemí

Výsledné síly	Centráž	
	Přední 24 [%] b _{SAT}	Zadní 39 [%] b _{SAT}
	[N]	[N]
F _{yt}	28081	28081
F _{xt}	7020	7020
F _{yh2}	24989	24989
F _{xh2}	7020	7020
F _{yp}	0	0
F _{xp}	0	0

5.5.4 Výpočet sil působících na podvozek při přistání s velkým úhlem náběhu

Stav letadla při přistání s velkým úhlem náběhu ukazuje obr. 5.5. Momenty vzniklé posunutím sil do os kol výpočet nezahrnuje.



Obr. 5.5 Přistání letadla s velkým úhlem náběhu

Svislá složka síly v těžišti letounu:

$$F_{yt} = n_{pr} \cdot m \cdot g \quad (5.20)$$

Vodorovná složka síly v těžišti letounu:

$$F_{xt} = 0 \quad (5.21)$$

Svislá složka síly na kola hlavního podvozku:

$$F_{yh2} = (n_{pr} - 0,667) \cdot m \cdot g \quad (5.22)$$

Vodorovná složka síly na kola hlavního podvozku:

$$F_{xh2} = 0 \quad (5.23)$$

Svislá složka síly na příďové kolo:

$$F_{yp} = 0 \quad (5.24)$$

Vodorovná složka síly na příďové kolo:

$$F_{xp} = 0 \quad (5.25)$$

Výsledky výpočtů sil pro maximální přední a zadní centráž zobrazuje tab. 5.6.

Tab. 5.6 Výsledné síly na podvozek při přistání s velkým úhlem náběhu

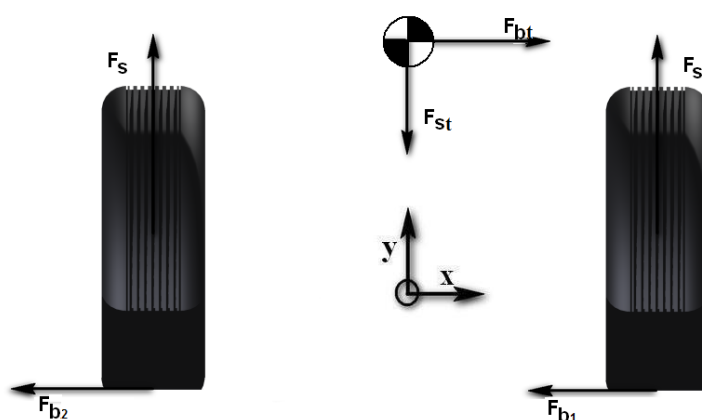
Výsledné síly	Centráž	
	Přední 24 [%] b_{SAT}	Zadní 39 [%] b_{SAT}
	[N]	[N]
F_{yt}	28081	28081
F_{xt}	0	0
F_{yh2}	24989	24989
F_{xh2}	0	0
F_{yp}	0	0
F_{xp}	0	0

5.6 Dodatečné případy pozemního zatížení podle UL 2

Výpočet předpokládá, že letadlo se nachází ve vodorovné poloze a kola hlavního podvozku se dotýkají země, dále se předpokládá stlačení tlumících prvků a pneumatik odpovídající statickým reakcím (stání na zemi).

5.6.1 Boční zatížení kol hlavního podvozku

Rozdělení sil je podle obr. 5.6.



Obr. 5.6 Boční zatížení hlavního podvozku

$$F_{st} = 1,34 \cdot m \cdot g \quad (5.26)$$

$$F_s = 0,67 \cdot m \cdot g \quad (5.27)$$

$$F_{bt} = 0,83 \cdot m \cdot g \quad (5.28)$$

$$F_{b1} = 0,5 \cdot m \cdot g \quad (5.29)$$

$$F_{b2} = 0,33 \cdot m \cdot g \quad (5.30)$$

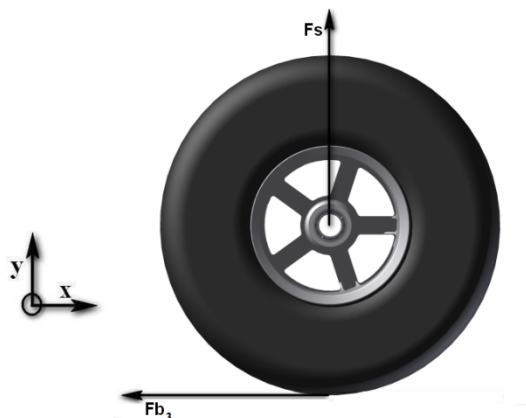
Hodnoty vypočtených sil shrnuje tab. 5.7.

Tab. 5.7 Boční zatížení hlavního podvozku

m[kg]	x _t [%]	F _{st} [N]	F _{bt} [N]	F _s [N]	F _{b1} [N]	F _{b2} [N]
472,5	24	6211	3847	3106	2318	1530
472,5	39	6211	3847	3106	2318	1530

5.6.2 Zatížení kol hlavního podvozku při brždění

Brzděná kola podvozku jsou kontrolována na zatížení dle obr. 5.7.



Obr. 5.7 Zatížení kol hlavního podvozku při brždění

$$F_s = 0,67 \cdot m \cdot g \quad (5.31)$$

$$F_{b3} = 0,54 \cdot m \cdot g \quad (5.32)$$

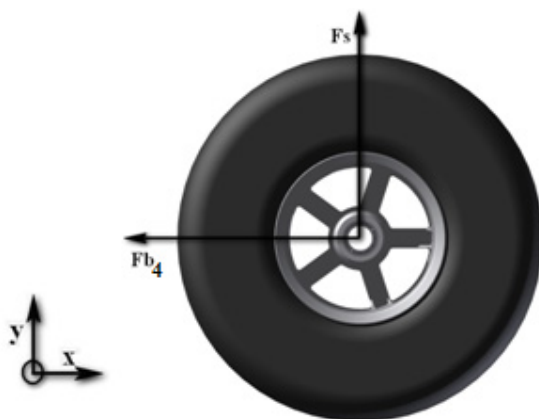
Vypočtené síly zobrazuje tab. 5.8.

Tab. 5.8 Zatížení kol hlavního podvozku při brždění

m[kg]	x _t [%]	F _s [N]	F _{b3} [N]
472,5	24	3106	2503
472,5	39	3106	2503

5.6.3 Zatížení předového kola působící dozadu

Předový podvozek musí být zkontrolován na zatížení podle obr. 5.8.



Obr. 5.8 Zatížení předového kola působící dozadu

$$F_s = 2,25 \cdot F_{sp} \quad (5.33)$$

$$F_{b4} = 0,8 \cdot F_s \quad (5.34)$$

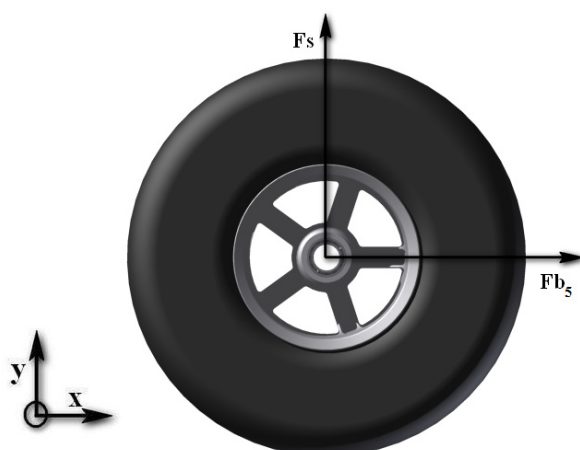
Vypočtené síly zobrazuje tab. 5.9.

Tab. 5.9 Zatížení předového kola působící dozadu

m[kg]	x _t [%]	F _s [N]	F _{b4} [N]
472,5	24	2282	1826
472,5	39	1074	859

5.6.4 Zatížení předového kola působící dopředu

Předový podvozek musí být zkontrolován na zatížení podle obr. 5.9.



Obr. 5.9 Zatížení předového kola působící dopředu

$$F_s = 2,25 \cdot F_{sp} \quad (5.35)$$

$$F_{b5} = 0,4 \cdot F_s \quad (5.36)$$

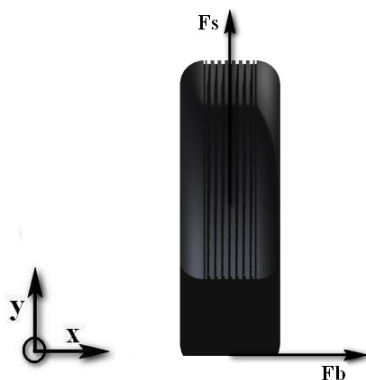
Vypočtené síly zobrazuje tabulka 5.10.

Tab. 5.10 Zatížení předového kola působící dopředu

m[kg]	x _t [%]	F _s [N]	F _{b5} [N]
472,5	27	2282	913
472,5	36	1074	430

5.6.5 Boční zatížení příďového kola

Příďový podvozek musí být zkontrolován na zatížení podle obr. 5.10.



Obr. 5.10 Boční zatížení příďového kola

$$F_s = 2,25 \cdot F_{sp} \quad (5.37)$$

$$F_{b1} = 0,7 \cdot F_s \quad (5.38)$$

Vypočtené síly zobrazuje tab. 5.11.

Tab. 5.11 Boční zatížení příďového kola

m[kg]	xt[%]	Fs[N]	Fb[N]
472,5	27	2282	1598
472,5	36	1074	752

5.7 Vyhodnocení výpočtu pozemního zatížení podvozku

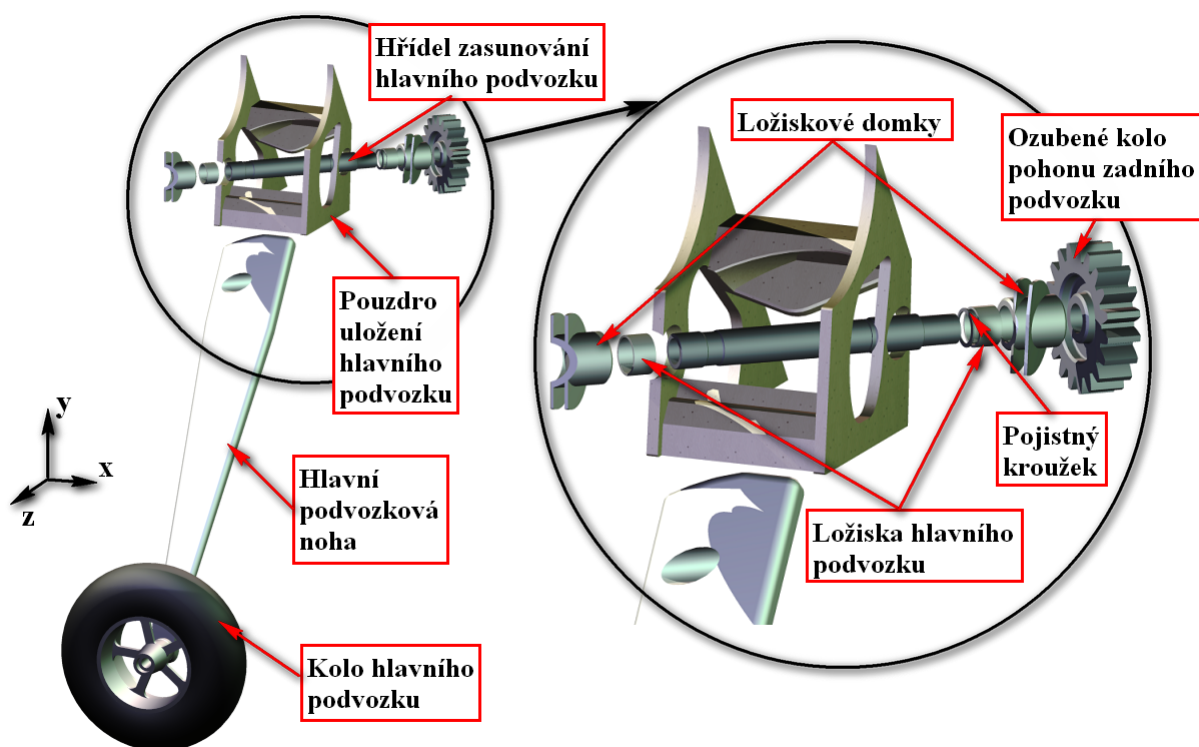
Pro návrh a pevnostní kontrolu předního podvozku bude rozhodující případ vodorovného přistání na 3 kola při přední centráži. Dalším pro návrh a pevnostní kontrolu hlavního podvozku bude rozhodující zatížení vypočítané pro případ vodorovného přistání s příďovým kolem nad zemí při zadní centráži. Tato zatížení vyšla totiž pro uvedené podvozky největší. V obou dvou případech je třeba zohlednit také dodatečná zatížení příslušných podvozků, jejichž vliv není možné dopředu předpokládat.

6 Návrh hlavního podvozku

Při návrhu hlavního podvozku je nutno brát ohled na okolní konstrukci draku letadla. Z možných kolizí při návrhu hlavního podvozku je třeba se vyhnout zejména zasažení zasunuté nohy do prostoru pro posádku letadla, konkrétně prostoru uložení sedadel. Dále je třeba zajistit, aby zatažený podvozek nevystupoval z bočního obrysu letadla. Malá kolize je přípustná ve spodním obrysu skořepiny trupu, kde je ji možno řešit aerodynamickým tvarováním kapoty hlavního podvozku.

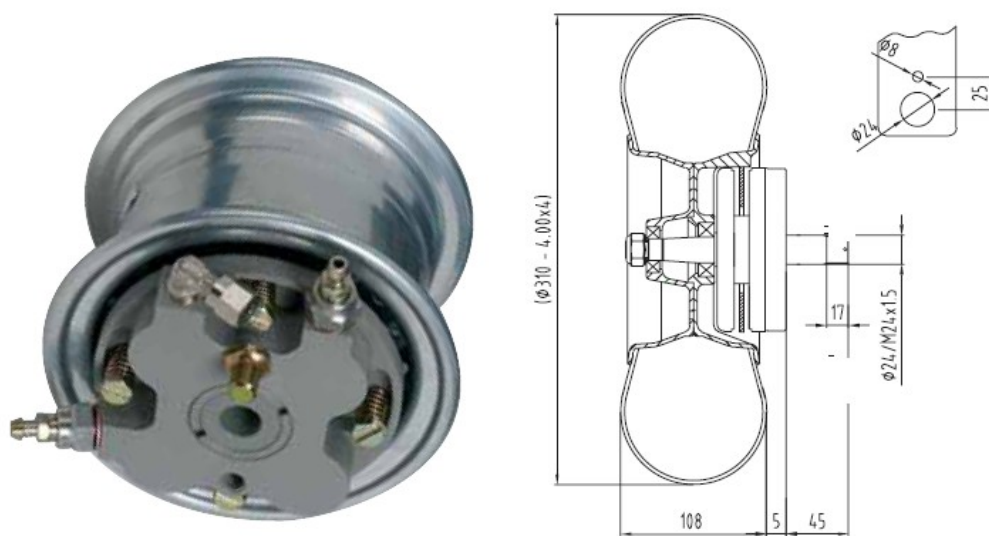
6.1 Popis konstrukce hlavního podvozku

Navržený hlavní podvozek zachovává polohu uložení v letadle podle původního pevného podvozku. Hlavní podvozková noha je s úpravami zachována z původního řešení pevného podvozku letadla (viz. kap. 3.2). Pouzdro uložení hlavního podvozku je z překližky a z tvrdého dřeva a vychází ze vzoru pouzdra původního pevného podvozku, který se v praxi již osvědčil. Sestava uložení hlavního podvozku s nejdůležitějšími součástmi je na obr. 6.1.



Obr. 6.1 Sestava uložení hlavního podvozku

Kola hlavního podvozku byla z původního průměru 350 mm nahrazena kolem průměru 310 mm na elektronovém 4" disku K-204 V od fy Kašpar (obr. 6.2).



Obr. 6.2 Disk s brzdou rozměr 4" typ K-204 V

Proces zatahování je zobrazen na obr. 6.3. Noha se otáčí o 130° směrem dozadu na hřídeli. Hřídel je uložen rovnoběžně s rovinou x-z a s osou x svírá úhel 45° .



Obr. 6.3 Proces zatahování hlavního podvozku

6.2 Pevnostní kontrola hlavního podvozku

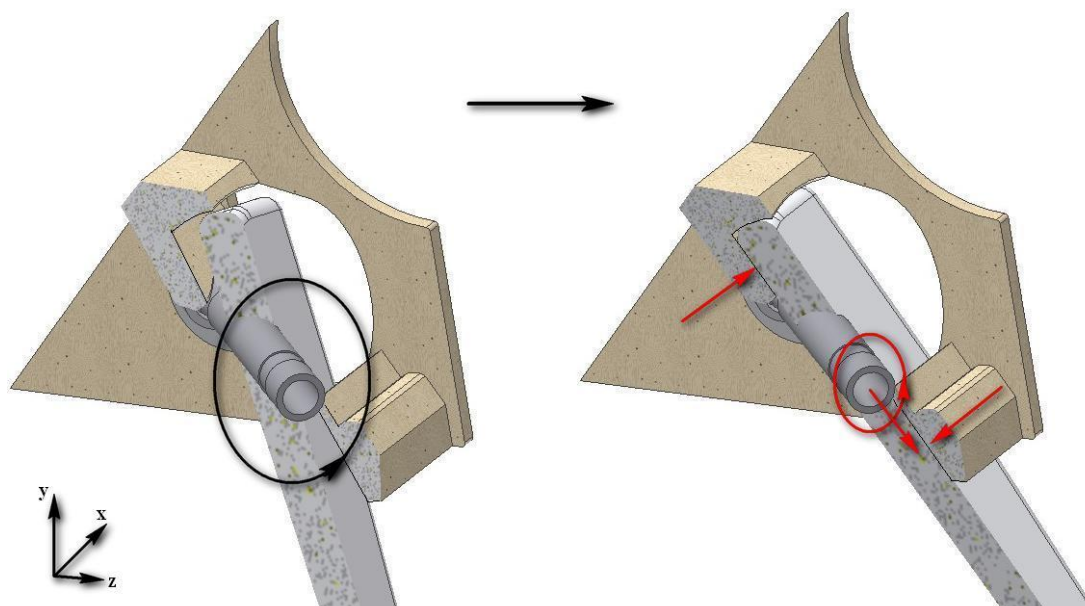
Obecný minimální součinitel bezpečnosti je stanoven $k_c=1,5$ [-], pro kompozitovou podvozkovou nohu platí zvýšená bezpečnost $k_k=2$ [-]. Detailně bude kontrolována pouze Hlavní podvozková noha a hřídel zasunování hlavní podvozkové nohy.

6.2.1 Zatížení hlavního podvozku

Hlavní podvozek je namáhán jednak pozemním zatížením od přistávání a stání letadla na zemi, které působí na kola podvozku, jednak aerodynamickými silami. Protože pozemní zatížení se předpokládá výrazně dominantní oproti aerodynamickému zatížení, zohledňuje pevnostní kontrola podvozku pouze toto zatížení.

6.2.1 Kontrola hlavní podvozkové nohy

Síly a momenty od pozemního zatížení jsou v rovině x-y zcela zachyceny podpěrami v pouzdře, o které se podvozek opírá ve vysunuté poloze (obr. 6.4). Síly a momenty v rovině x-z jsou zachyceny v ložiskách hřídele zatahování.



Obr. 6.4 Upevnění hlavní podvozkové nohy v pouzdře

Kontrola je provedena v programu ANSYS Workbench metodou MKP. Materiálem podvozkové nohy je skořepina z uhlíkového kompozitu s epoxidovou matricí, vyplněná tvrdou epoxidovou pěnou (viz kap. 3.2). Skořepina je tvořena 12ti vrstvami jednosměrného uhlíku 400 tex, položeného ve směru osy symetrie nohy. Diagonálně je skořepina spevněna 3mi vrstvami stejné tkaniny. Podíl vláken v kompozitu je 54%. Ve výpočtu se pro zjednodušení počítá s materiálem skořepiny v celém průřezu nohy.

Materiálové konstanty kompozitu jsou silně závislé na směru položení kompozitu vůči namáhání. Výchozí hodnoty pro přepočet jsou z [6] pro úhel θ položení kompozitu vůči vztažné soustavě. Materiálové konstanty uhlíkového kompozitu jsou shrnuty v tab.6.1.

Stanovení úhlu položení kompozitu θ vůči rovině x-y

počet vrstev kompozitu kolmých k rovině x-y $n_o=12$

počet vrstev kompozitu diagonálních (45°) k rovině x-y $n_d=3$

$$\Theta = \frac{n_o \cdot 90 + n_d \cdot 45}{n_o + n_d} = \frac{12 \cdot 90 + 3 \cdot 45}{15} = 81^\circ \quad (6.1)$$

Stanovení meze pevnosti kompozitu

mez pevnosti uhlíkového vlákna $\sigma_{mu}=2350$ [MPa]

podíl vláken v kompozitu $r=54$ [%]

mez pevnosti epoxidové pryskyřice $\sigma_{me}=30$ [MPa]

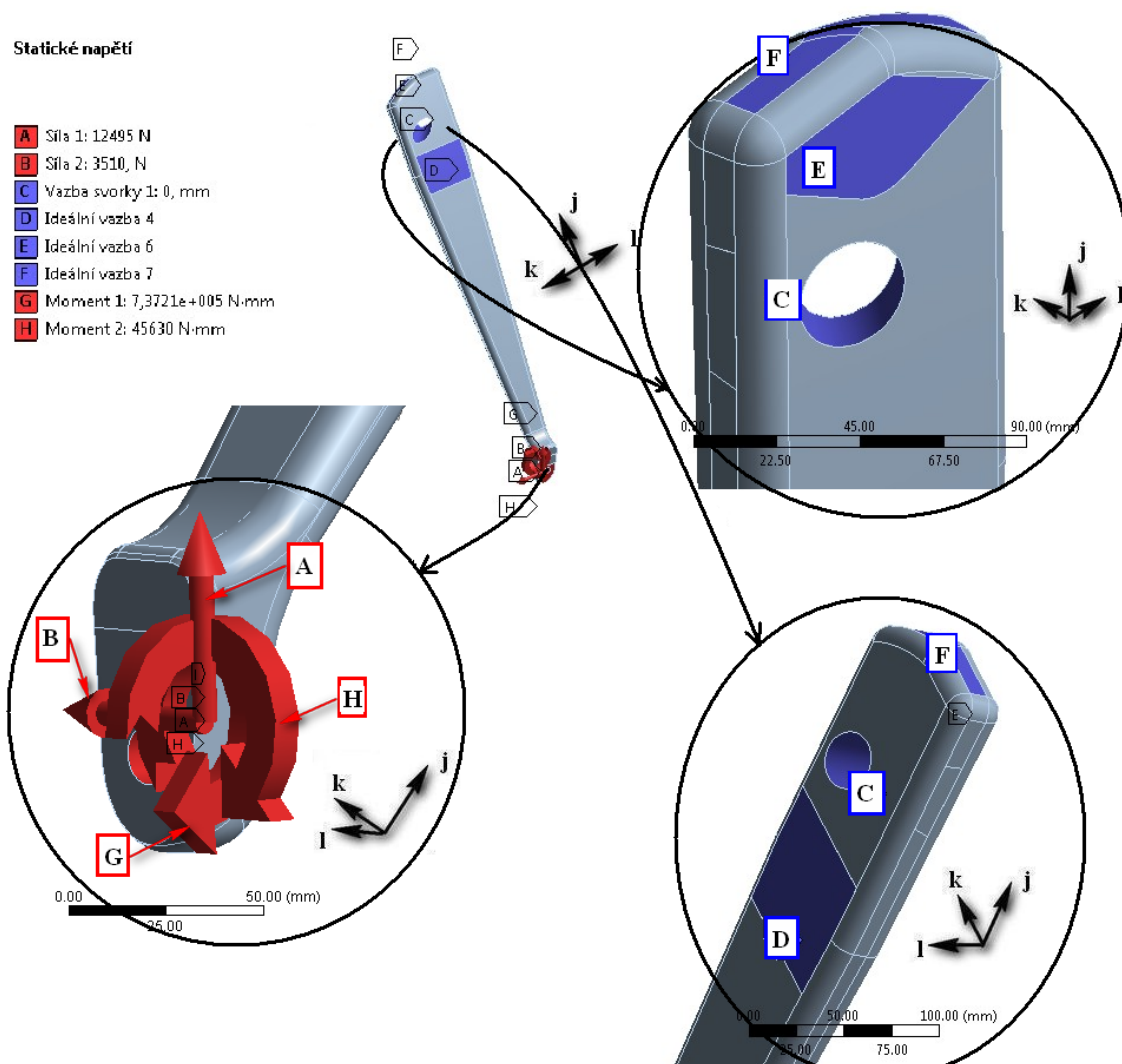
$$\sigma_{mc} = \sigma_{mu} \cdot r + \sigma_{me} \cdot (1 - r) = 2350 \cdot 0,54 + 30 \cdot 0,46 = 1282,8 \text{ [MPa]} \quad (6.2)$$

Tab. 6.1 Materiálové konstanty uhlíkového kompozitu

E_j [Mpa]	100 · 10 ³	μ_j [-]	0,28	G_j [Mpa]	7,1 · 10 ³
E_k [Mpa]	22 · 10 ³	μ_k [-]	0,23	G_k [Mpa]	8,8 · 10 ³
E_l [Mpa]	10 · 10 ³	μ_l [-]	0,02	G_l [Mpa]	6,9 · 10 ³
ρ_c [kg mm³]	2 · 10 ⁻⁶				
σ_{mc} [Mpa]	1282,8				

Okrajové podmínky výpočtu

Zavedená zatížení a podpory jsou na obr. 6.5. Pro výpočet pevnosti hlavní podvozkové nohy byl zaveden nezávislý souřadný systém zohledňující směr položení kompozitu.



Obr. 6.5 Okrajové podmínky výpočtu hlavní podvozkové nohy.

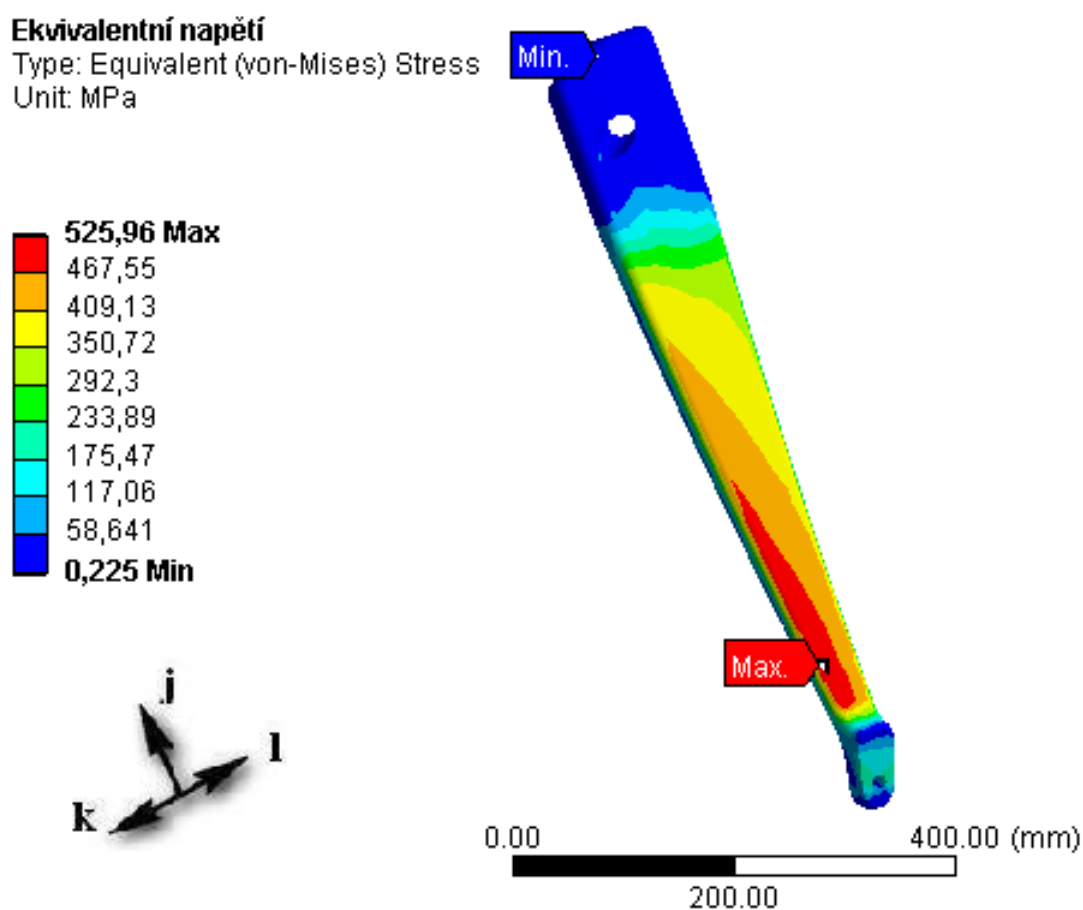
$$\text{Moment 1 } M_1 = F_{yh} \cdot s = 12495 \cdot 59 = 737205 [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (6.3)$$

$$\text{Moment 2 } M_2 = F_{xh} \cdot d_k / 2 = 3510 \cdot 130 = 456300 [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (6.4)$$

Kde s je vzdálenost roviny souměrnosti kola od podvozkové nohy a $d_k/2$ je poloměr kola hlavního podvozku.

Výsledky pevnostní kontroly hlavní podvozkové nohy

Maximální napětí $\sigma_{mn}=525,96$ [Mpa] bylo zjištěno v místě zúženého profilu nohy před osazením pro osu kola. Výsledek analýzy je na obr. 6.6, kde je jasně vidět mapa rozložení napětí.



Obr. 6.6 Výsledky MKP napěťové analýzy hlavní podvozkové nohy

Součinitel statické bezpečnosti

$$k_s = \frac{\sigma_{mc}}{\sigma_{mn}} = \frac{1282,8}{525,96} = 2,43 [-] \quad (6.5)$$

$$k_s \leq k_k \Rightarrow \text{Noha VYHOVUJE}$$

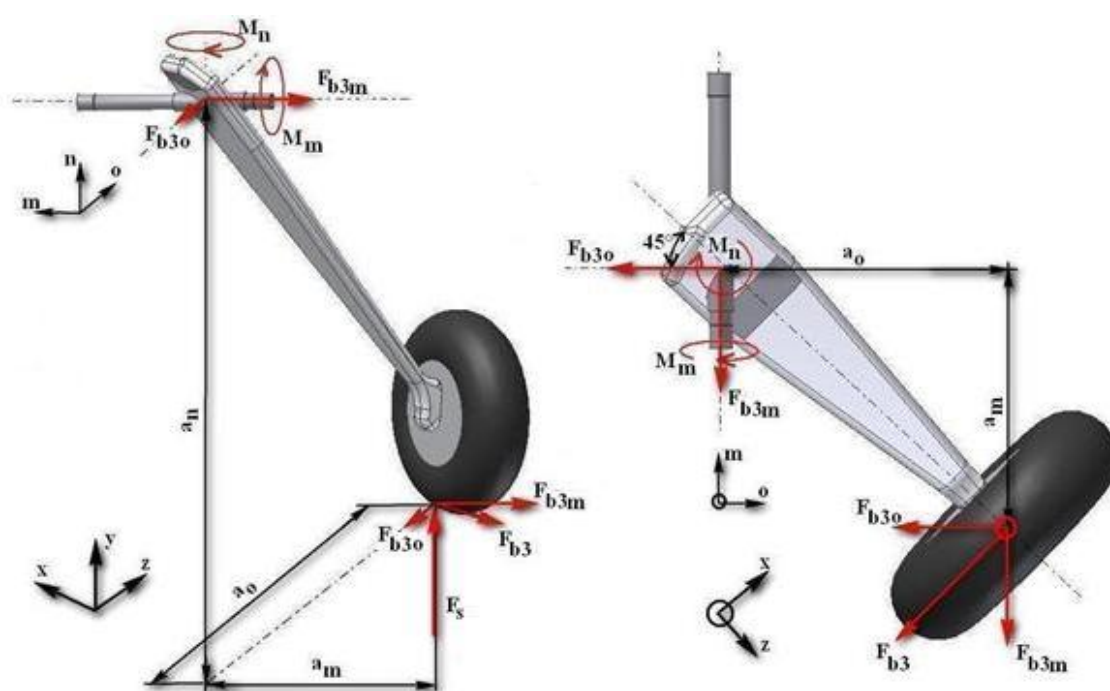
6.3.3 Kontrola hřídele

Zatížení hřídele

Hřídel zatahování hlavního podvozku je namáhána silami a momenty působícími v rovině x-z a přenáší je do ložisek v překližkovém pouzdře .

Silový rozbor pro zatížení při brzdění

Podvozek je zatěžován silami vypočtenými v kapitole 5.4 pro dodatečné zatížení hlavního podvozku při brzdění. Silový rozbor zatížení je na obr. 6.7.



Obr. 6.7 Silový rozbor zatížení hřídele hlavní podvozkové nohy při brzdění

$$F_{b3m} = F_{b3} \cdot \sin 45 = 2503 \cdot \sin 45 = 1769 \text{ [N]} \quad (6.6)$$

$$F_{b3o} = F_{b3} \cdot \cos 45 = 2503 \cdot \sin 45 = 1769 \text{ [N]} \quad (6.7)$$

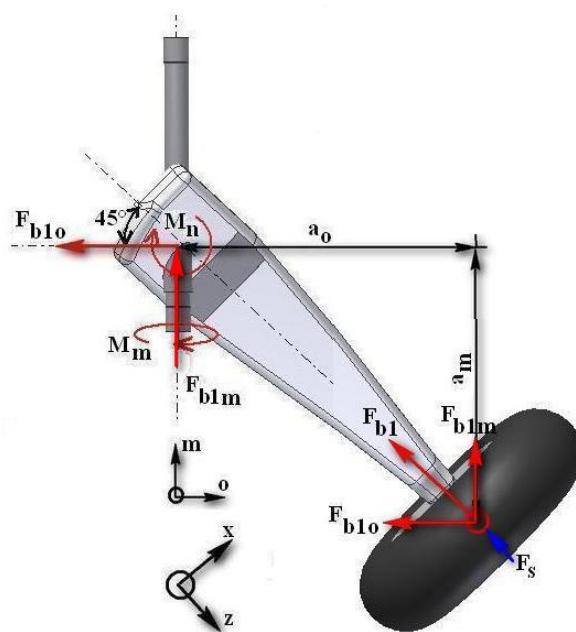
$$M_n = F_{b3m} \cdot a_o + F_{b3o} \cdot a_m = 1769 \cdot 0,281 + 1769 \cdot 0,281 = 994,2 \text{ [Nm]} \quad (6.8)$$

$$M_m = F_{b3o} \cdot a_n - F_s \cdot a_o = 1769 \cdot 0,683 - 3105 \cdot 0,281 = 335,7 \text{ [Nm]} \quad (6.9)$$

Síla F_s je zachycována podporami v pouzdře pro zatížení hřídele je ale důležitý její vliv na krouticí moment M_m .

Silový rozbor pro dodatečné boční zatížení

Podvozek je zatěžován silami vypočtenými v kapitole 5.4 pro dodatečné zatížení hlavního podvozku bočním zatížením. Silový rozbor zatížení je na obr. 6.8.



Obr. 6.8 Silový rozbor zatížení hřídele hlavní podvozkové nohy při bočním zatížení

$$F_{b1m} = F_{b1} \cdot \sin 45 = 2318 \cdot \sin 45 = 1639 \text{ [N]} \quad (6.10)$$

$$F_{b1o} = F_{b1} \cdot \cos 45 = 2318 \cdot \sin 45 = 1639 \text{ [N]} \quad (6.11)$$

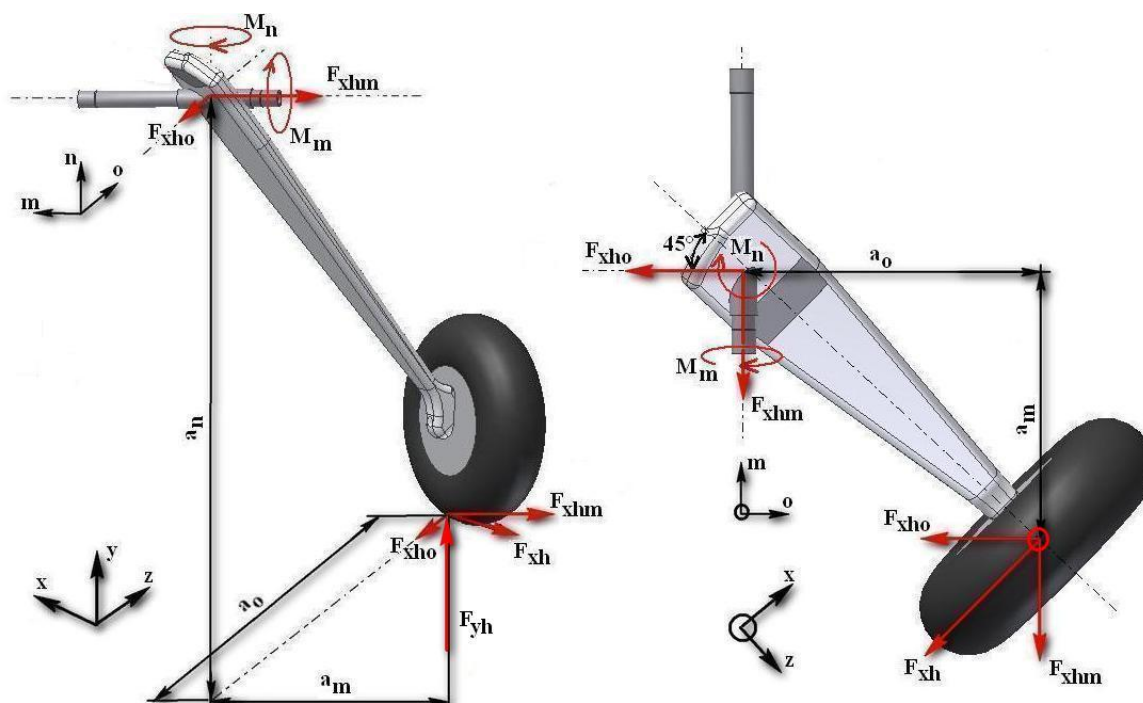
$$M_n = F_{b1m} \cdot a_o + F_{b1o} \cdot a_m = 1639 \cdot 0,281 + 1639 \cdot 0,281 = 921,1 \text{ [Nm]} \quad (6.12)$$

$$M_m = F_{b1o} \cdot a_n - F_s \cdot a_o = 1639 \cdot 0,683 - 3105 \cdot 0,281 = 246,9 \text{ [Nm]} \quad (6.13)$$

Síla F_s je zachycována podporami v pouzdře pro zatížení hřídele je ale důležitý její vliv na krouticí moment M_m .

Silový rozbor pro zatížení při přistání

Podvozek je zatěžován silami vypočtenými v kapitole 5.3 pro přistání s velkým úhlem náběhu. Silový rozbor zatížení je na obr. 6.9.



Obr. 6.9 Silový rozbor zatížení hřídele hlavní podvozkové nohy při přistání

$$F_{xhm} = F_{xh} \cdot \sin 45 = 1558 \cdot \sin 45 = 2482 \text{ [N]} \quad (6.14)$$

$$F_{xho} = F_{xh} \cdot \cos 45 = 1558 \cdot \cos 45 = 2482 \text{ [N]} \quad (6.15)$$

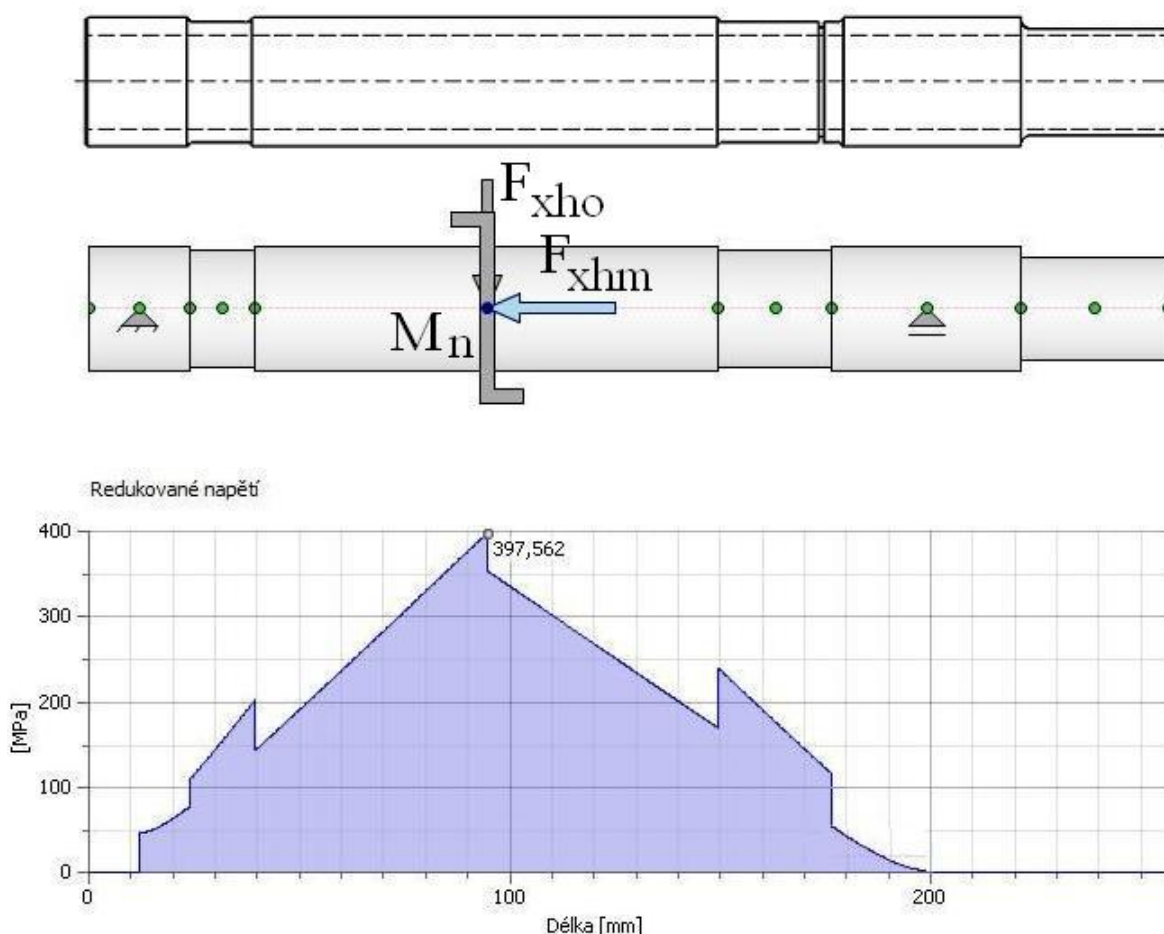
$$M_n = F_{xhm} \cdot a_o + F_{xho} \cdot a_m = 2482 \cdot 0,281 + 2482 \cdot 0,281 = 1395 \text{ [Nm]} \quad (6.16)$$

$$M_m = F_{xho} \cdot a_n - F_{yh} \cdot a_o = 2482 \cdot 0,683 - 12495 \cdot 0,281 = -1816 \text{ [Nm]} \quad (6.17)$$

Síla F_{yh} je zachycována podporami v pouzdře pro zatížení hřídele je ale důležitý její vliv na kroutící moment M_m . Kroutící moment M_m se v tomto případě na hřídel ve skutečnosti nepřenáší, protože je ve svém záporném směru zachycován podporami v překližkovém pouzdře.

Pevnostní kontrola napětí na hřídeli

Výpočet napětí je proveden v softwaru [17], v modulu Design akcelerator. Hřídel je navržena z materiálu 15 230.7, která má $R_e=835$ [MPa]. Hřídel je zatížena silami a momenty vypočtenými pro zatížení při přistání. Průběh redukovaného napětí je na obr. 6.10.



Obr. 6.10 Výsledek kontroly hřídele zatahování hlavního podvozku

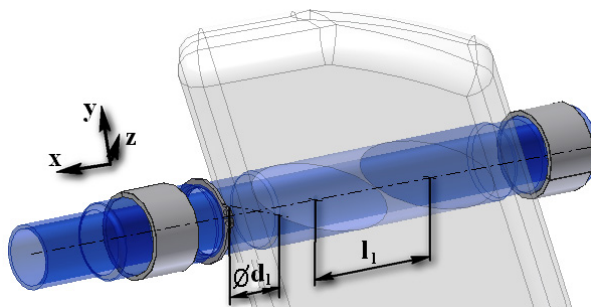
Součinitel statické bezpečnosti

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{\max}} = \frac{835}{398} = 2,1[-] \quad (6.18)$$

$$k_s \leq k_c \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

6.3.4 Kontrola uložení hřídele v podvozkové noze

Hřídel je do podvozkové nohy zalepená. Spoj je proveden vložením podchlazené hřídele do podvozkové nohy, aby vzniklý přesah eliminoval mezery mezi materiálem hřídele a nohy a zároveň se tak zvýší pevnost spoje. Zatížení spoje jsou převzaty z kapitoly 6.3.3. Rozměry, důležité pro kontrolu spoje jsou na obr. 6.11. Pro spoj je požadován zvýšený minimální součinitel bezpečnosti $k_k=2$ [-].



Obr. 6.11 Spoj hřídele zatahování hlavního podvozku s hlavní podvozkovou nohou

Namáhání při přistání

$$\tau_0 = \frac{F_{xhm}}{\pi \cdot d_l \cdot l_l} = \frac{2482}{\pi \cdot 0,03 \cdot 0,051} = 0,51 [\text{MPa}] \quad (6.19)$$

Kontrola na zatížení při brždění

$$\tau_K = \frac{2 \cdot M_m}{\pi \cdot d_l^2 \cdot l_l} = \frac{2 \cdot 335,7}{\pi \cdot 0,03^2 \cdot 0,051} = 4,66 [\text{MPa}] \quad (6.20)$$

$$\tau_0 = \frac{F_{xhm}}{\pi \cdot d_l \cdot l_l} = \frac{1769}{\pi \cdot 0,03 \cdot 0,051} = 0,37 [\text{MPa}] \quad (6.21)$$

Výsledné napětí:

$$\tau_c = \sqrt{\tau_K^2 + \tau_0^2} = \sqrt{4,66^2 + 0,37^2} = 4,67 [\text{MPa}] \quad (6.22)$$

Spoj je proveden lepidlem LOCTITE skupiny 2, které má pevnost ve smyku $\tau_{D2} = 20 [\text{MPa}]$ [7].

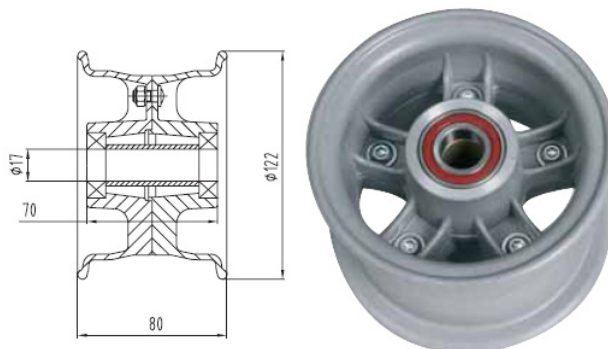
Součinitel statické bezpečnosti

$$k_s = \frac{\tau_{D2}}{\tau_c} = \frac{20}{4,67} = 4,3 [-] \quad (6.23)$$

$$k_s \leq k_k \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

7 Návrh předního podvozku

Návrh předem předpokládá zachování dotykového bodu pneumatiky podle původní geometrie pevného podvozku (viz. kapitola 5). Kola hlavního podvozku byla z původního průměru 300 mm nahrazena kolem s pneumatikou 260x85 od fy TOST Flugzeuggerätebau na elektronovém 4" disku K-114 A od fy Kašpar (obr. 7.1).



Obr. 7.1 Disk rozměr 4" typ K-114 A

Při návrhu předního podvozku není možné zcela respektovat stávající vnitřní konstrukci letadla. Řadu součástí je třeba upravit tak, aby vznikl prostor pro uložení přední podvozkové nohy a předového kola s mechanismem zasouvání. Zejména se nelze vyhnout kolizi se stávajícím systémem pedálového řízení, jehož osy jsou průchozí téměř celou šířkou letadla v místech, kam se bude zatahovat přední podvozková noha. Další nevyhnutelnou kolizí je spodní závěs motorového lože, kde bude třeba závěs upravit do tvaru „Y“, aby tak vznikl prostor pro přední podvozkovou nohu. Pro kontrolu kolizí je třeba vyřešit kinematiku předního podvozku.

7.1 Kinematika předního podvozku

Při návrhu kinematiky zasouvání bylo zvažováno více řešení. Možnost použití zalomené nohy, nebo zasouvání proti směru letu s otáčením kola naplocho pod motor by sice zmenšily prostor nutný pro zatažení podvozku do trupu, ale nevyřešily by zcela problém kolizí s vnitřní konstrukcí a zvyšovaly by složitost a hmotnost konstrukce.

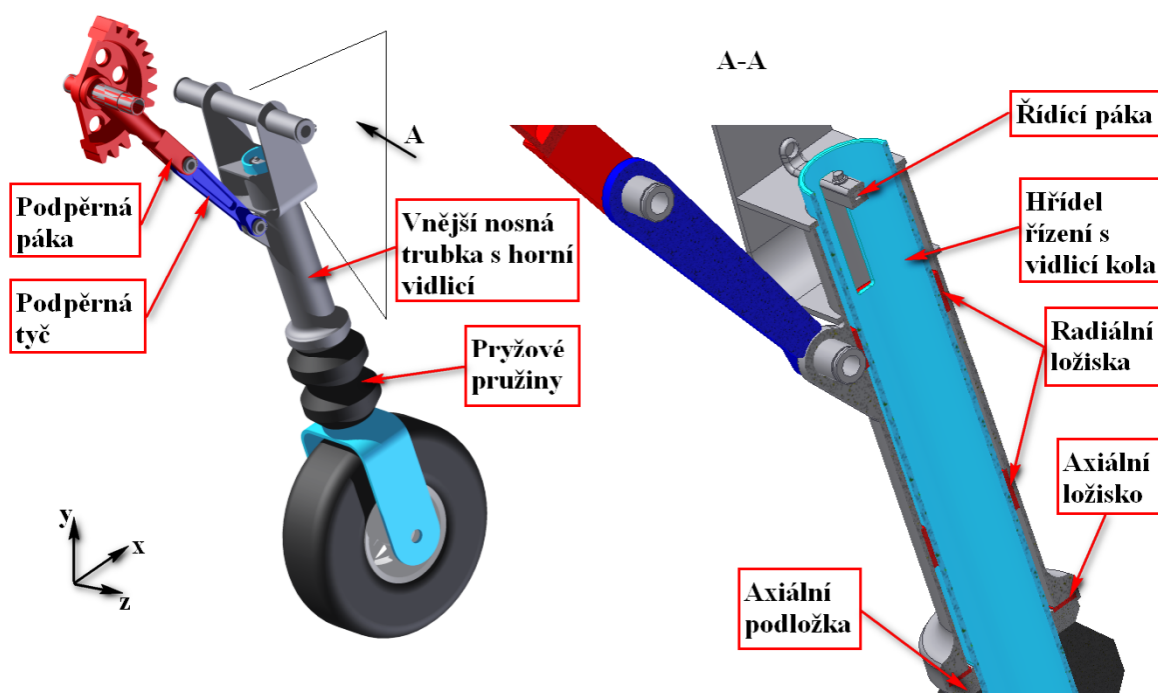
Zvolená koncepce kinematiky je jednoduché řešení s nedělenou podvozkovou nohou. Osa otáčení podvozku je posunuta co nejvíce dopředu, aby zatažené kolo co nejméně zasahovalo do prostoru palivové nádrže. Kinematika zatahování předního podvozku je na obr. 7.2.



Obr.7.2 Kinematika zatahování předního podvozku

7.2 Konstrukční řešení přední podvozkové nohy

Přední podvozková se skládá ze svařence vnější nosné trubky s horní vidlicí a svařence hřídele řízení s vidlicí kola. Noha je proti ohybu podepřena dvoudílnou zalamovací vzpěrou. Vzpěra se skládá z podpěrné páky s ozubeným kolem pohonu a z podpěrné tyče. Podpěrná páka slouží zároveň jako akční člen zatahování podvozku. Páka je otáčena kolem osy pomocí ozubeného kola, kterým pohybuje ozubená tyč. Základní součásti předního podvozku jsou na obr. 7.3.



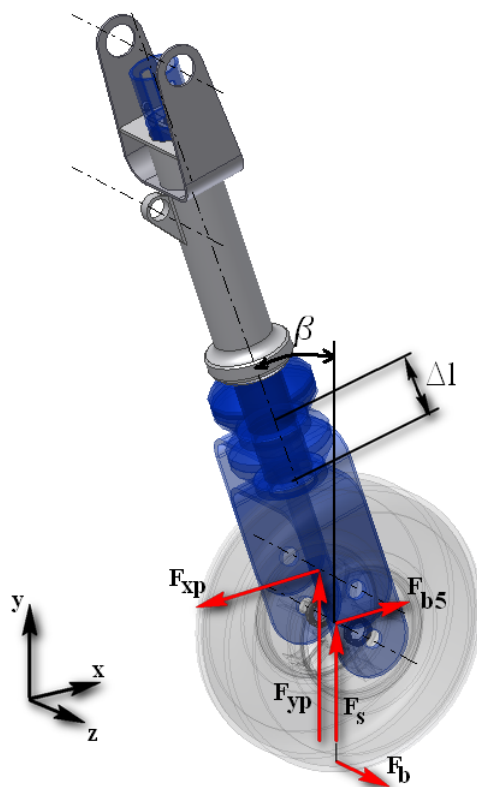
Obr. 7.3 Základní prvky předního podvozku

7.3 Pevnostní kontrola předního podvozku

Pro všechny kontrolované součásti předního podvozku platí obecný součinitel bezpečnosti $k_c=1,5$ [-]. Kontrolovány budou pouze nejdůležitější součásti.

7.3.1 Zatížení předního podvozku

Podvozek je zatěžován za podmínek vypočtených v kapitole 5. Pro návrh a pevnostní kontrolu předního podvozku bude rozhodující případ vodorovného přistání na 3 kola při přední centrāži (dále jen přistání na 3 kola). Toto zatížení, které se projevuje silami F_{yp} a F_{xp} způsobuje výrazné stlačení gumových pružin Δl . Dále je nutno zkontrolovat podvozek na případy doplňkového zatížení působícího směrem dopředu a do boku při přední centrāži. Tato zatížení se projevují silami F_s , F_b a F_{b5} . Doplňkové zatížení směrem dozadu není nutné brát v úvahu, protože síly jsou v tomto případě daleko menší, než síly při vodorovném přistání na 3 kola při stejných směrem a působištích. Doplňková zatížení způsobí pouze malou deformaci gumových pružin Δl , protože působí pouze statickou silou v ose y . Situaci přibližuje obr. 7.4.



Obr. 7.4 Zatížení a konfigurace přední podvozkové nohy

Rozklad zatěžujících sil na podvozkovou nohu při přistání na 3 kola

Výsledná síla

$$F_{C1} = \sqrt{F_{yp}^2 + F_{xp}^2} = \sqrt{9682^2 + 2720^2} = 10057 \text{ [N]} \quad (7.1)$$

Úhel mezi celkovou silou a přední podvozkovou nohou

$$\delta_1 = \beta - \arctg \frac{F_{yp}}{F_{xp}} = 17,78 - \arctg \frac{9682}{2729} = 2,09 [^\circ] \quad (7.2)$$

Normální síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{N1} = F_{C1} \cdot \sin \delta_1 = 10057 \cdot \sin 2,09 = 366,49 \text{ [N]} \quad (7.3)$$

Osová síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{O1} = F_{C1} \cdot \cos \delta_1 = 10057 \cdot \cos 2,09 = 10051 \text{ [N]} \quad (7.4)$$

Deformace pryžových pružin při F_{O1} : $\Delta l = 53 \text{ [mm]}$ (viz. příloha1)

Rozklad zatěžujících sil při dodatečném případě zatížení dopředu

Celková síla

$$F_{C2} = \sqrt{F_{bs}^2 + F_s^2} = \sqrt{913^2 + 2282^2} = 2458 \text{ [N]} \quad (7.5)$$

Úhel mezi celkovou silou a přední podvozkovou nohou

$$\delta_2 = \beta + \arctg \frac{F_{bs}}{F_s} = 17,78 + \arctg \frac{913}{2282} = 39,59 [^\circ] \quad (7.6)$$

Normální síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{N2} = F_{C2} \cdot \sin \delta_2 = 2458 \cdot \sin 39,59 = 1567 \text{ [N]} \quad (7.7)$$

Osová síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{O2} = F_{C2} \cdot \cos \delta_2 = 2458 \cdot \cos 39,59 = 1894 \text{ [N]} \quad (7.8)$$

Deformace pryžových pružin při F_{O2} : $\Delta l = 5,7 \text{ [mm]}$ (viz. příloha1)

Rozklad zatěžujících sil při dodatečném případě zatížení doboku

Normální síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{N3} = \sqrt{(F_S \cdot \sin \beta)^2 + F_b^2} = \sqrt{(2282 \cdot \sin 17,78)^2 + 1598^2} = 1743 [\text{N}] \quad (7.9)$$

Osová síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{O3} = F_S \cdot \cos \beta = 2282 \cdot \cos 17,78 = 2173 [\text{N}] \quad (7.10)$$

Deformace pryžových pružin při F_{O2} : $\Delta l = 5,9 [\text{mm}]$ (viz. příloha 1)

Rozklad zatěžujících sil při dodatečném případě zatížení dozadu

Celková síla

$$F_{C2} = \sqrt{F_{b4}^2 + F_S^2} = \sqrt{1826^2 + 2282^2} = 2923 [\text{N}] \quad (7.11)$$

Úhel mezi celkovou silou a přední podvozkovou nohou

$$\delta_4 = \beta - \arctg \frac{F_{b4}}{F_S} = 17,78 - \arctg \frac{1826}{2282} = 20,89 [^\circ] \quad (7.12)$$

Normální síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{N4} = F_{C4} \cdot \sin \delta_4 = 2923 \cdot \sin 20,89 = 1042 [\text{N}] \quad (7.13)$$

Osová síla na přední podvozkovou nohu

$$F_{O4} = F_{C4} \cdot \cos \delta_4 = 2923 \cdot \cos 20,89 = 2731 [\text{N}] \quad (7.14)$$

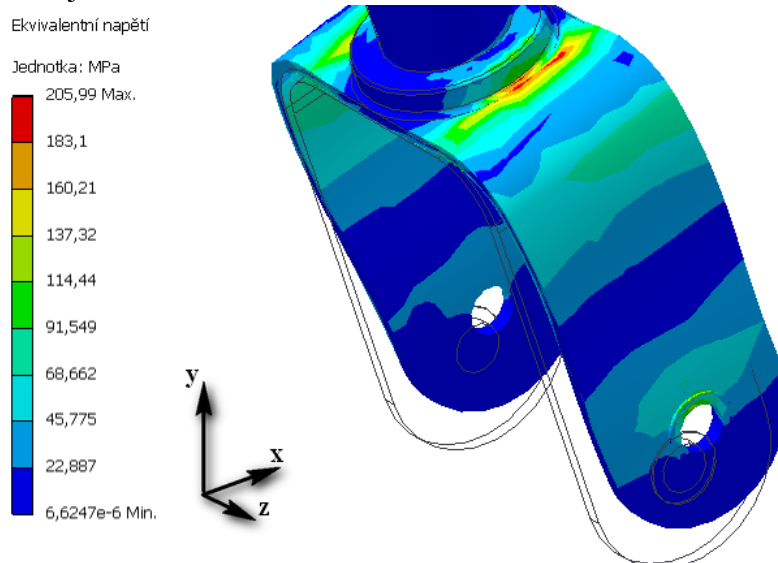
Deformace pryžových pružin při F_{O2} : $\Delta l = 7,3 [\text{mm}]$ (viz. příloha 1)

7.3.2 Kontrola vidlice předního kola

Vidlice předního kola je svařená do jednoho celku s hřídelí řízení. Vidlice je tvořená ohnutým plechovým výstřižkem tloušťky 5 [mm]. Vidlice, i hřídel jsou navrženy z materiálu 15 230, který má $R_e=835$ [MPa] a je doporučovaný pro namáhané díly. Obecný minimální součinitel bezpečnosti je stanoven $k_c=1,5$ [-]

Kontrola vidlice předního kola na zatížení při přistání na 3 kola

Kontrola byla provedena metodou MKP v softwaru [17]. Zatěžující síla F_{xp} o velikosti 2720 [N] a F_{yp} o velikosti 9682 [N] byla umístěna do děr pro osu kola. Vazby byly umístěny na kontaktní plochy ložisek na hřídeli řízení , a na nákržky u děr pro osu kola (aby se zabránilo boční deformaci do tvaru “A”). Výsledek kontroly na zatížení při přistávání na 3 kola je na obr. 7.5.



Obr. 7.5. Kontrola vidlice předního kola na zatížení při přistání na 3 kola

Součinitel statické bezpečnosti

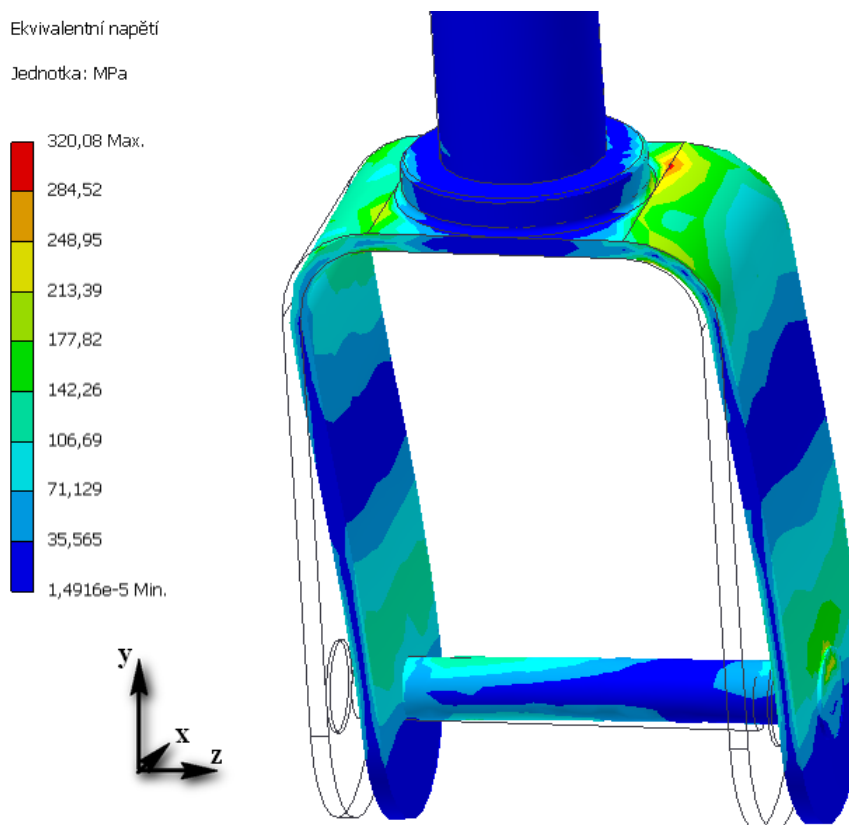
Z důvodu polohy maximálního vypočteného napětí blízko svaru vidlice kola s hřídelí zatahování je do výpočtu zařazen převodní součinitel pro koutové svary k_4 .

$$k_s = \frac{R_e \cdot k_4}{\sigma_{\max}} = \frac{835 \cdot 0,65}{205,99} = 2,64 [-] \quad (7.15)$$

$$k_s \leq k_c \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Kontrola vidlice předního kola na dodatečné boční zatížení

Kontrola byla provedena metodou MKP v softwaru [17]. Zatěžující síly $F_s=2282$ [N], $F_b=1598$ [N] byly umístěny doprostřed osy kola. Vazby byly umístěny na kontaktní plochy ložisek na hřídeli řízení. Výsledek kontroly na dodatečné boční zatížení je na obr. 7.6.



Obr. 7.6. Kontrola vidlice předního kola na dodatečné boční zatížení

Součinitel statické bezpečnosti

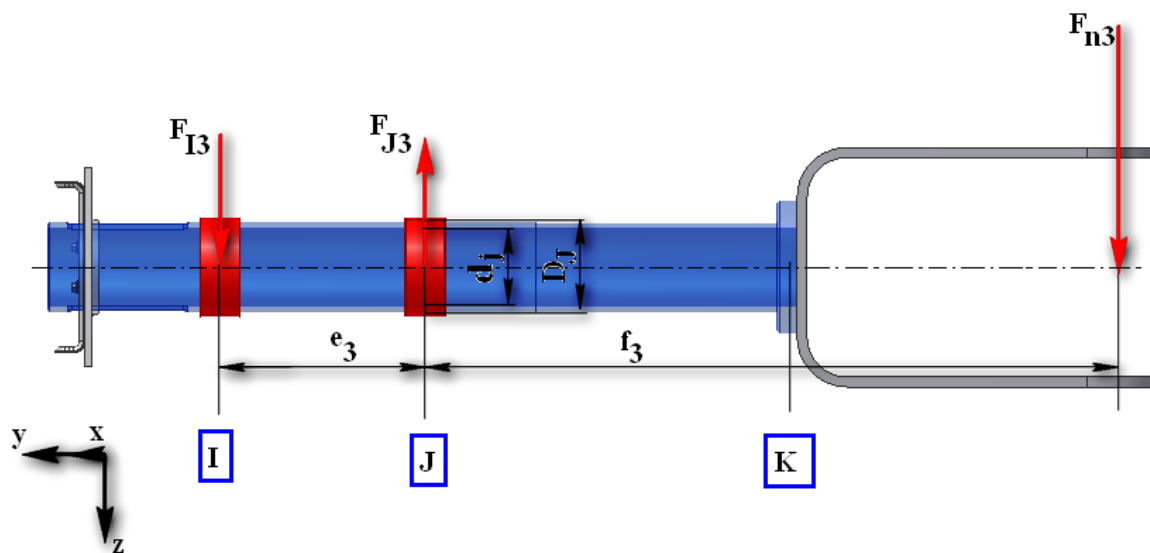
Z důvodu polohy maximálního vypočteného napětí blízko svaru vidlice kola s hřídelí zarahování je do výpočtu zařazen převodní součinitel pro koutové svary k_4 .

$$k_s = \frac{R_e \cdot k_4}{\sigma_{\max}} = \frac{835 \cdot 0,65}{320,08} = 1,70 \quad [-] \quad (7.15)$$

$$k_s \leq k_c \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

7.3.3 Kontrola hřídele řízení

Hřídel řízení je jedna z nejnamáhanějších součástí sestavy přední podvozkové nohy. Přenáší síly a momenty z vidlice předního kola na sestavu vnější nosné trubky s podporami. Hřídel vetknutá do vidlice předního kola v uzlu K. Spoj je svařovaný. V uzlech I a J jsou radiální kluzná ložiska. Hřídel není namáhána axiálním zatížením, vyjma osazení nad vidlicí předního kola, o které se opírají pružiny. Výpočet toto zatížení zanedbává, hřídel je kontrolována na zatížení radiálními silami, vypočtenými v kapitole 7.3.1 pro dodatečné zatížení do boku, kde vychází největší zatěžující síla. Hřídel řízení je zatěžována podle obr. 7.7.



Obr. 7.7 Silový rozbor na hřídeli řízení při dodatečném zatížení do boku

Výpočet reakcí a momentu na hřídeli

$$R_{I3} = F_{n3} \cdot \frac{f_3}{e_3} = 1743 \cdot \frac{331,3}{103} = 5606 \text{ [N]} \quad (7.16)$$

$$R_{J3} = F_{n3} + R_{I3} = 1743 + 5606 = 7349 \text{ [N]} \quad (7.17)$$

Ohybový moment v místě J

$$M_{OJ} = F_{n3} \cdot f_3 = 1743 \cdot 331,3 = 577455,9 \text{ [Nmm]} \quad (7.18)$$

Ohybový modul průřezu hřídele řízení v místě J

$$W_{OJ} = \frac{\pi \cdot D_J^3}{32} \cdot \left(1 - \frac{d_J^4}{D_J^4}\right) = \frac{\pi \cdot 45^3}{32} \cdot \left(1 - \frac{39,5^4}{45^4}\right) = 3635,2 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (7.19)$$

Maximální ohybové napětí na hřídeli

$$\sigma_{OJ} = \frac{M_{OJ}}{W_{OJ}} = \frac{577455,9}{3635,2} = 158,41 \text{ [MPa]} \quad (7.20)$$

Součinitel statické bezpečnosti

$$k_s = \frac{R_e}{\sigma_{OJ}} = \frac{835}{158,41} = 5,2 [-] \quad (7.21)$$

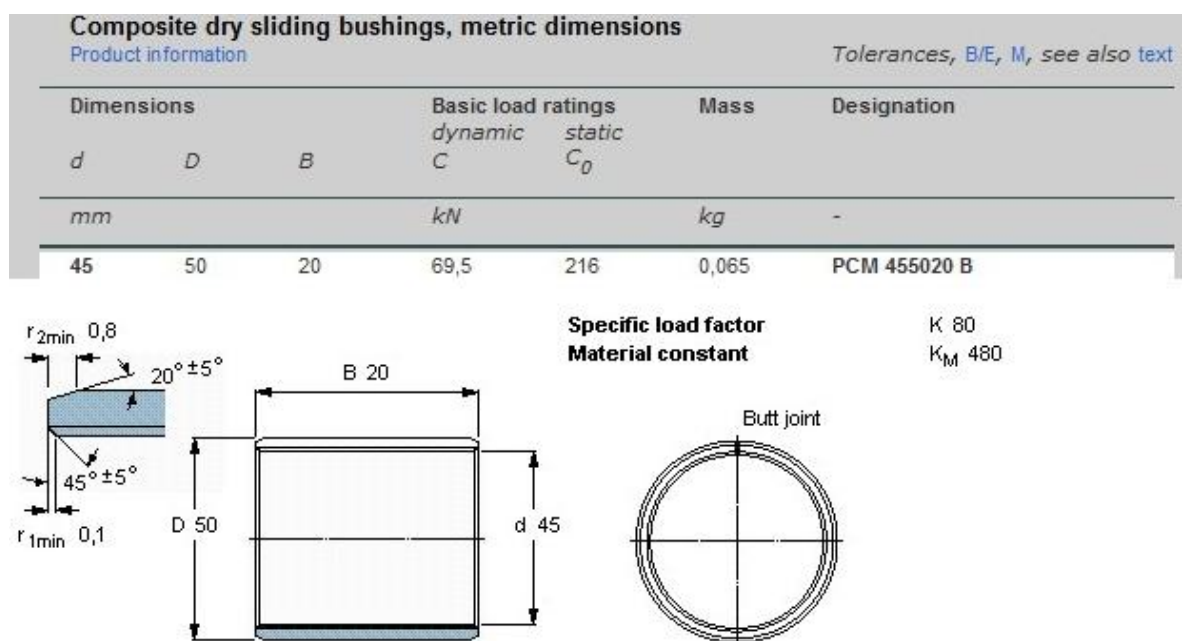
$$k_s \leq k_c \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

7.3.4 Kontrola ložisek hřídele řízení

Radiální uložení je kontrolováno na reakce vypočtené v kapitole 7.2.3 pro případ dodatečného zatížení doboku v uzlu J. Axiální uložení je kontrolováno na reakce vypočtené pro případ vodorovného přistání na 3 kola v kapitole 7.2.1. Obě ložiska vyžadují povrch protikusu obrobený alespoň na $R_a=0,5 \text{ [}\mu\text{m]}$.

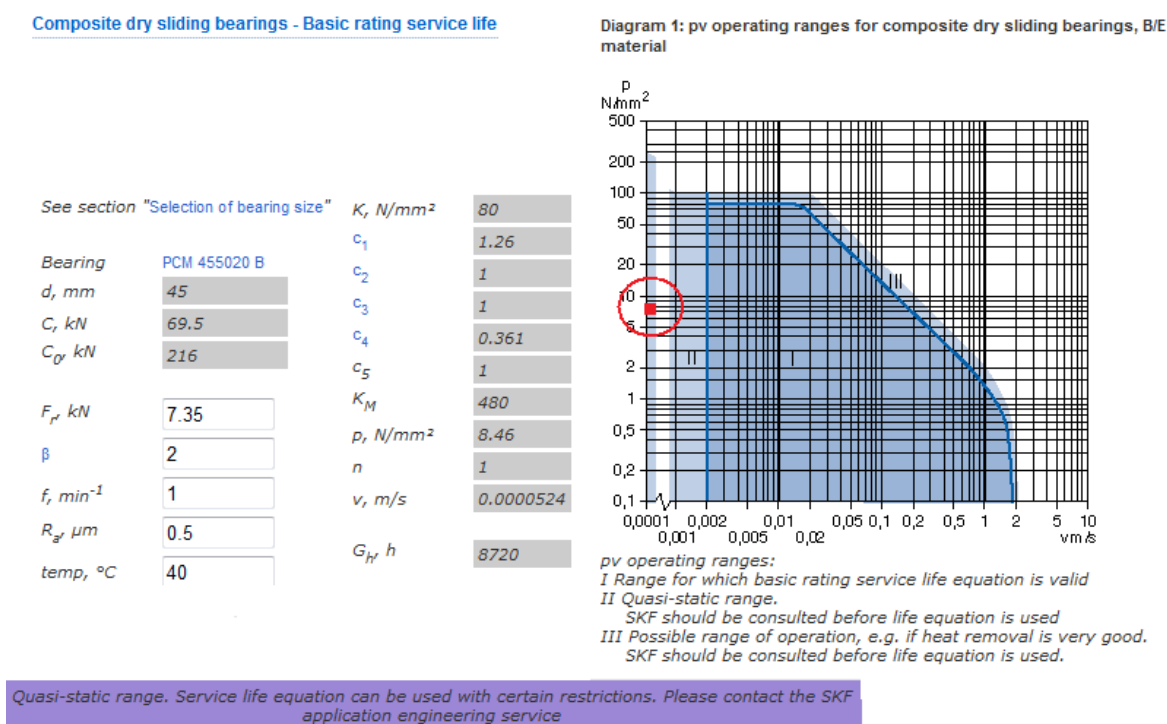
Kontrola radiálního uložení

Radiální uložení hřídele je v uzlech I a J shodné. Hřídel je uložena v kluzných bezúdržbových vložkách fy SKF typ PCM 455020 B. Základní údaje o ložiskách jsou na obr. 7.8 [8].



Obr. 7.8 radiální ložisko hřídele řízení

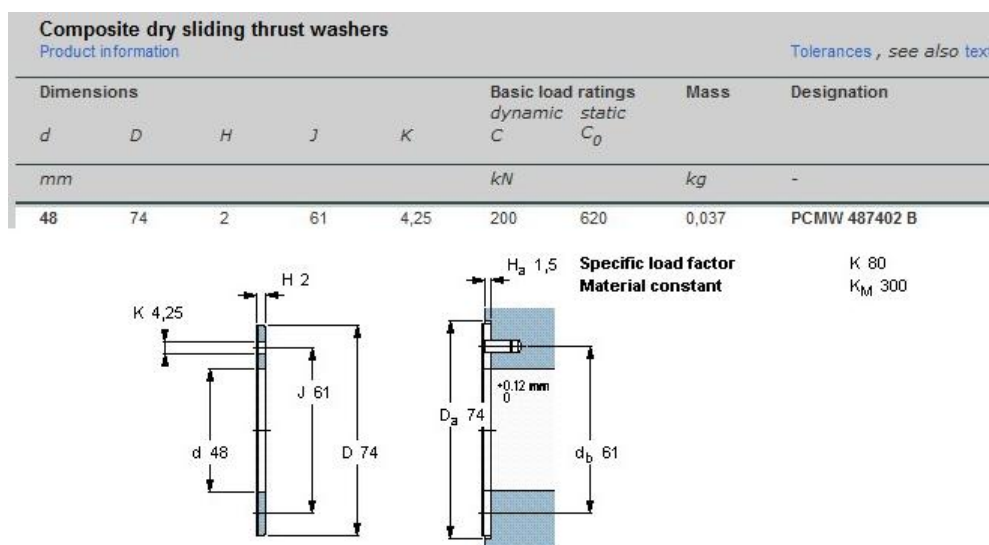
Výpočet byl proveden on-line pomocí webového kalkulátoru SKF [8] a je zobrazen na obr. 7.9. Výsledek výpočtu sice dává varování, lze se však domnívat, že ložisko vyhovuje, protože při zatížení maximální silou hřídel v ložisku nerotuje. Ložisko pouze staticky přenáší zatížení. Řízení přední podvozkové nohy a tedy rotace hřídele v ložisku je možná pouze až je letadlo po dosednutí na zem částečně zbržděno, v této chvíli ale již na nohu působí zlomek z maximální síly předpokládané při výpočtu.



Obr. 7.9 Výpočet radiálního ložiska v kalkulátoru SKF

Kontrola axiálního uložení

Axiálně je hřídel uložen pomocí axiálního kroužku fy SKF typ PCMW 264401.5.M
Základní údaje o ložisku jsou na obr. 7.10 [8].



Obr. 7.10 Axiální ložisko hřídele řízení

Výpočet byl proveden on-line pomocí webového kalkulátoru SKF [8] a je zobrazen na obr. 7.11. Výsledek výpočtu sice dává varování, lze se však domnívat, že ložisko vyhovuje, stejně jako radiální uložení.

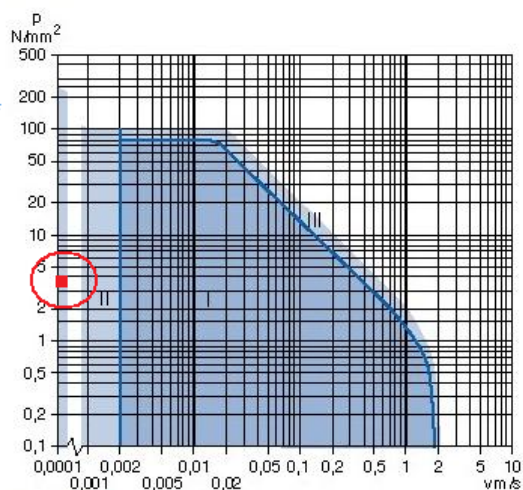
Composite dry sliding bearings - Basic rating service life

Every care has been taken to ensure the accuracy of this calculation but no liability can be accepted for any loss or damage whether direct, indirect or consequential arising out of the use of the calculation.

See section "Selection of bearing size"

Bearing	PCMW 487402 B	K , N/mm ²	80
J , mm	61	c_1	1.28
C , kN	200	c_2	1
C_0 , kN	620	c_3	1
F_a , kN	10.1	c_4	0.361
β	2	c_5	1
f_r , min ⁻¹	1	K_M	300
R_a , μ m	0.5	p , N/mm ²	4.04
temp, °C	40	n	1
		v , m/s	0.000071
		G_H , h	5546

Diagram 1: pv operating ranges for composite dry sliding bearings, B/E material



pv operating ranges:
I Range for which basic rating service life equation is valid
II Quasi-static range.
SKF should be consulted before life equation is used
III Possible range of operation, e.g. if heat removal is very good.
SKF should be consulted before life equation is used.

Quasi-static range. Service life equation can be used with certain restrictions. Please contact the SKF application engineering service

Obr. 7.11 Výpočet axiálního ložiska v kalkulátoru SKF

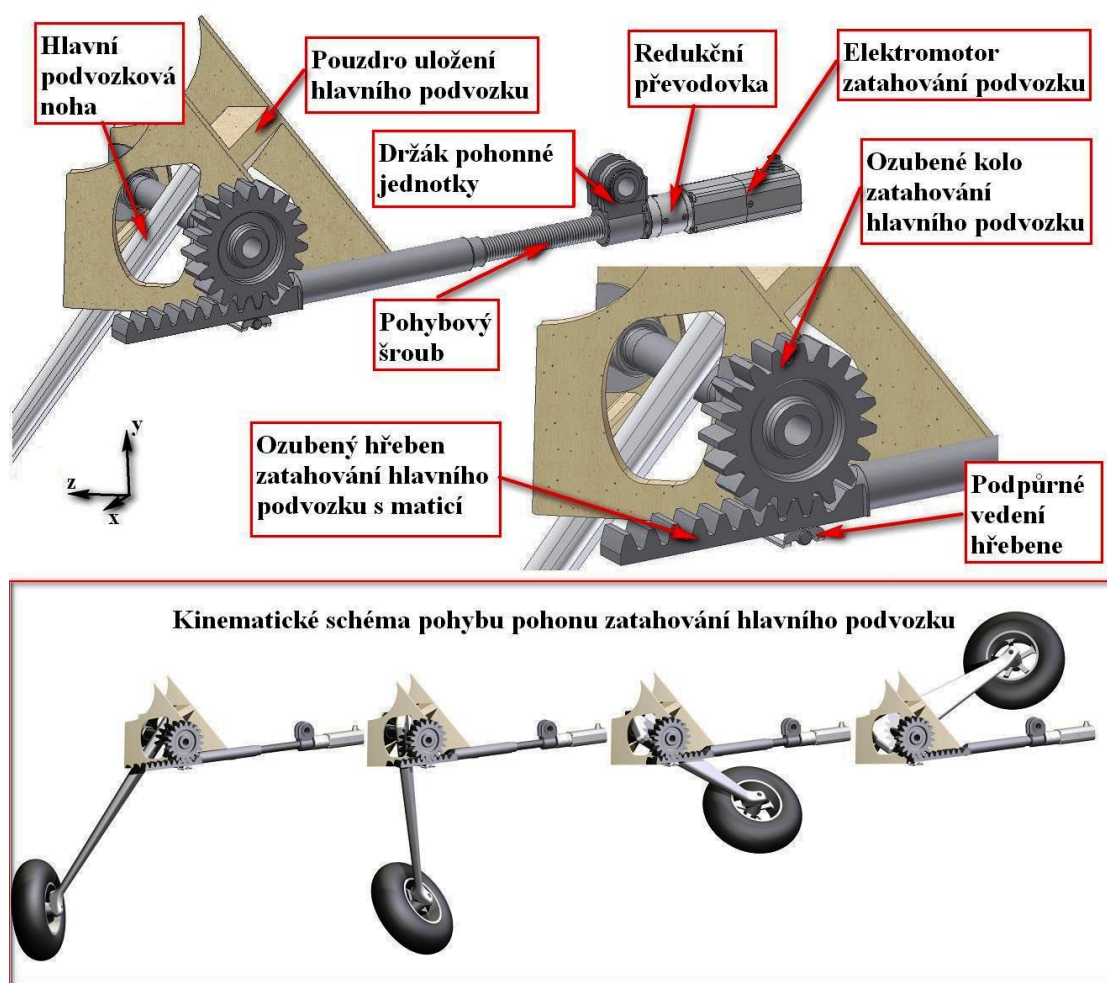
8 Návrh pohonu zatahování podvozku

Pohon zatahování podvozku má 2 základní funkce. Jednak zajišťuje vysunování a zasunování podvozkových noh, jednak musí být schopen udržet podvozkové nohy stabilně v zasunuté a vysunuté poloze.

8.1 Návrh kinematiky systému zatahování

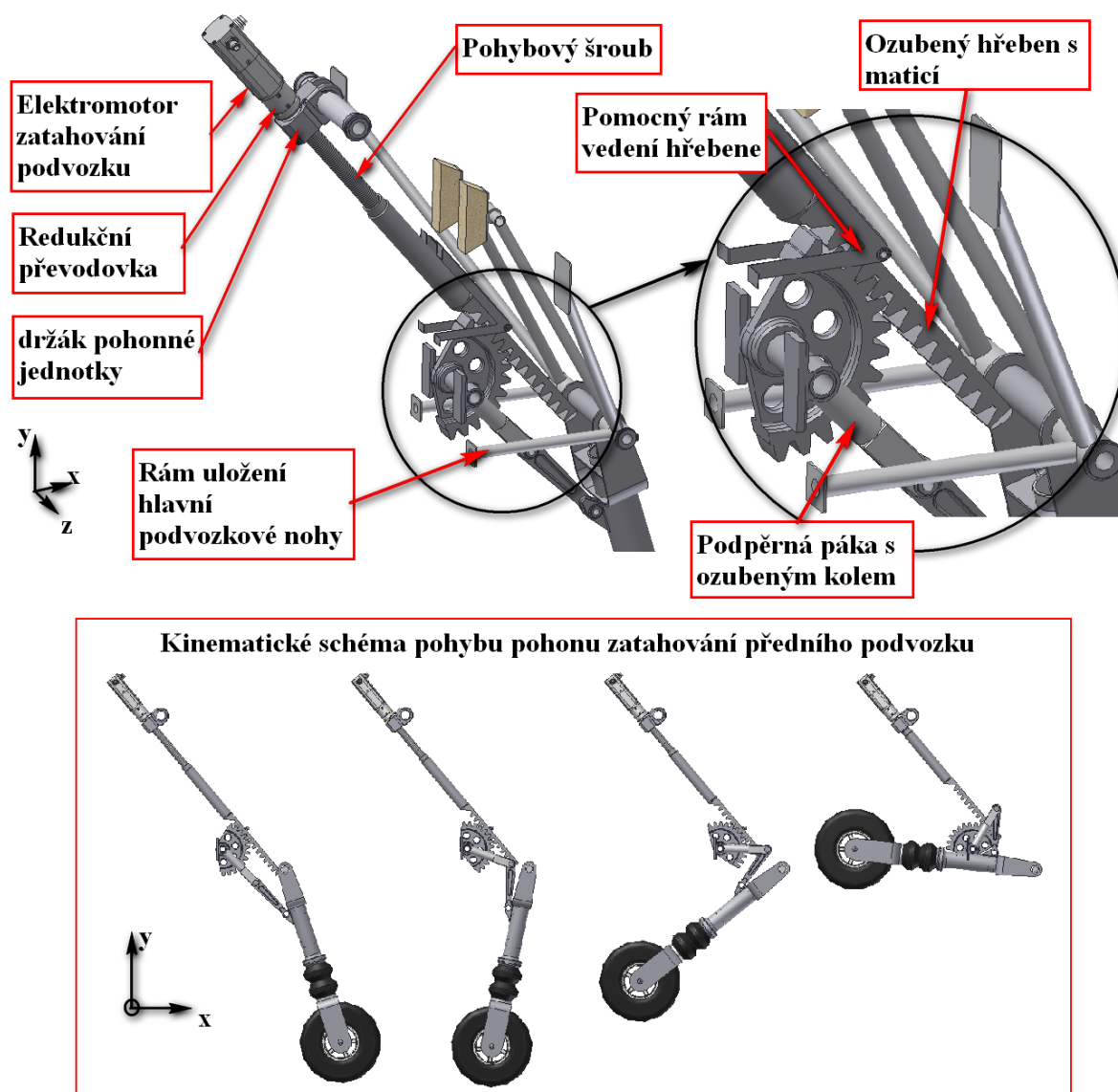
Všechny podvozky jsou poháněny stejnými pohonnými jednotkami. Pohonná jednotka se skládá z elektromotoru s převodovkou, který roztáčí pohybový šroub, jehož matice posunuje ozubenou tyč (tyč pro přední podvozek má více zubů).

Ovládání hlavního podvozku se děje otáčením ozubených kol na hřídelích zasunování hlavních podvozkových noh. Tato ozubená kola jsou roztáčena posuvem ozubených tyčí, které jsou součástí kompaktních pohonných jednotek. Schéma systému zatahování hlavního podvozku je na obr. 8.1.



Obr.8.1 Schéma systému zatahování hlavního podvozku

Ovládání předního podvozku se děje otáčením ozubeného kola na podpěrné páce. Schéma systému zatahování předního podvozku je na obr. 8.2.



Obr.8.2 Schéma systému zatahování hlavního podvozku

8.2 Zatížení systému zatahování

Systém je zatěžován krouticími momenty od ozubených kol na hřídelích zasunování hlavních podvozkových noh a krouticím momentem od ozubeného kola na páce zatahování předního podvozku. Tyto momenty jsou pomocí ozubeného kola a hřebene převedeny na osově síly, které zachytává pohybový šroub. Vznikající radiální síly jsou zachyceny podpůrným vedením hřebene.

Krouticí momenty jsou dvojího druhu. Jednak jsou to krouticí momenty od pozemního zatížení, tedy vyvolané silami při přistání letadla, jednak jsou to momenty vyvolané vlastní tíhou podvozku, které je nutné překonat při zatahování podvozkových noh do trupu.

Zatímco krouticí momenty od tíhy podvozku jsou důležité pro návrh elektromotoru zasunování podvozku, krouticí momenty od pozemního zatížení, které jsou mnohem větší, jsou určující pro dimenzování všech ostatních součástí pohonu podvozku.

8.2.1 Krouticí momenty od pozemního zatížení

Krouticí moment na hřídeli hlavních podvozkových noh

Maximální krouticí moment od pozemního zatížení na hřídeli zatahování hlavních podvozkových noh byl vypočten v kap. 6.3 $M_m=335,7$ [N·m] (zatížení při brždění).

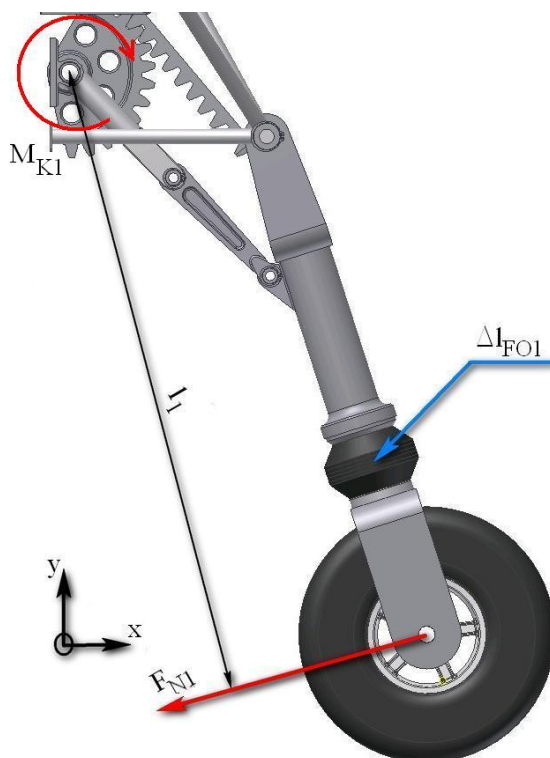
Krouticí moment na páce zatahování předního podvozku

Pro zatížení mechanismu zatahování jsou důležité jenom ty momenty, které působí ve směru zatahování podvozkové nohy do trupu (při přistání na 3 kola a při dodatečném zatížení dozadu). Opačné momenty způsobí pouze napnutí soustavy podpor a zatíží je tahovým napětím.

Krouticí moment při přistání na 3 kola

$$M_{K1} = F_{N1} \cdot l_1 = 366,9 \cdot 0,655 = 240,32 \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (8.1)$$

Silový rozbor vzniku krouticího momentu na hřídeli zatahování při přistání na 3 kola je na obr. 8.2.

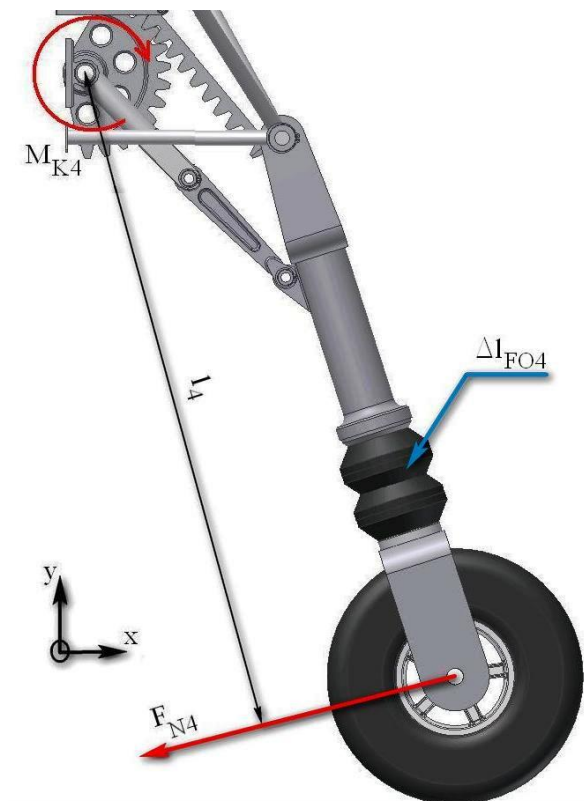


Obr. 8.2 Silový rozbor vzniku krouticího momentu na hřídeli zatahování při přistání na 3 kola

Krouticí moment při doplňkovém zatížení dozadu

$$M_{K4} = F_{N4} \cdot l_4 = 1042 \cdot 0,698 = 727 \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (8.2)$$

Silový rozbor vzniku krouticího momentu na hřídeli zatahování páce při přistání na 3 kola je na obr. 8.3.



Obr. 8.3 Silový rozbor vzniku krouticího momentu na hřídeli zatahování při doplňkovém zatížení dozadu

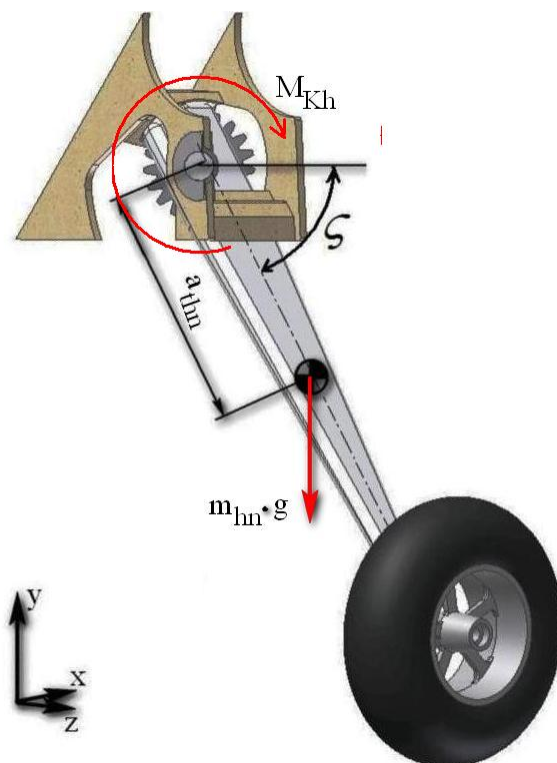
8.2.2 Krouticí momenty od tíhy podvozku

Mechanismus zatahování musí překonat krouticí moment od tíhy podvozkových noh, aby mohlo dojít ke zvednutí a zatažení podvozkových noh do trupu. Při zatahování podvozku musí být letadlo v normální letové konfiguraci, kdy platí tíhové zrychlení 1G. Je však potřeba počítat s tím že jakmile je podvozek zatažený, může pilot plně využít povolené letové obálky letadla a vykonávat manévry s přetížením do +4G (podle kap. 3.1).

Poloha těžiště sestav podvozkových noh pro výpočet byla zjištěna pomocí softwaru [17].

Krouticí moment na hřídeli hlavních podvozkových noh

Silový rozbor vzniku krouticího momentu od vlastní tíhy na hřídeli zatahování je na obr. 8.4.



Obr. 8.4 Silový rozbor vzniku krouticího momentu od vlastní tíhy na hřídeli zatahování hlavní podvozkové nohy

Úhel natočení podvozkové nohy

$$\zeta \in \langle 55^\circ - 185^\circ \rangle$$

Vzdálenost těžiště podvozkové nohy od osy hřídele

$$a_{thn} = 0,326 [\text{m}]$$

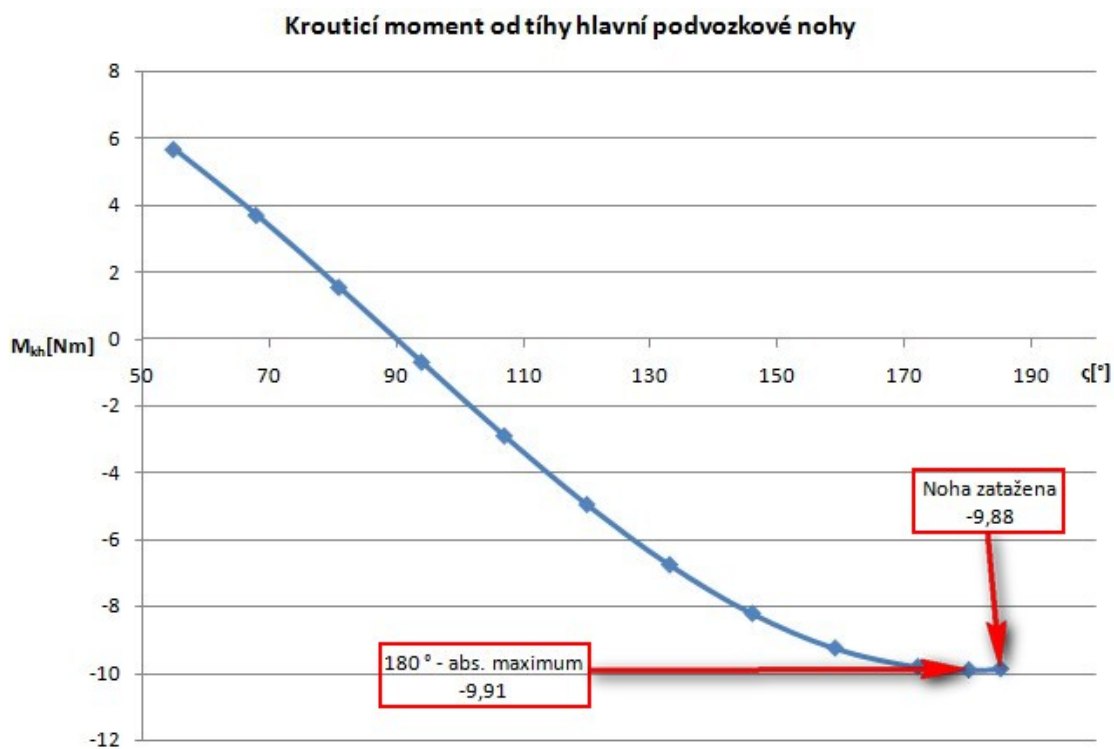
Hmotnost podvozkové nohy (s kolem)

$$m_{hn} = 3,1 [\text{kg}]$$

Základní krouticí moment od tíhy hlavní podvozkové nohy

$$M_{Kh} = m_{hn} \cdot g \cdot \cos \zeta \cdot a_{thn} \quad (8.3)$$

Grafické znázornění výsledných momentů pro různé úhly natočení podvozkové nohy je na obr. 8.5.



Obr. 8.5 Krouticí moment od tíhy hlavní podvozkové nohy v závislosti na úhlu natočení podvozkové nohy

Maximální krouticí moment od tíhy hlavní podvozkové nohy při zatahování

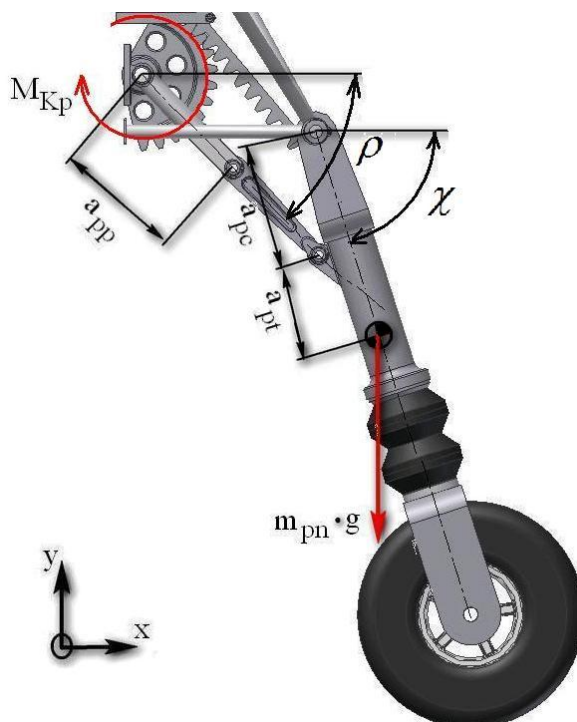
$$M_{Khm} = M_{Kh180} = 9,91 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

Absolutní maximální krouticí moment od tíhy hlavní podvozkové nohy

$$M_{Kh \max} = M_{Kh185} \cdot 4 = 9,88 \cdot 4 = 39,52 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (8.4)$$

Krouticí moment na páce zatahování přední podvozkové nohy

Silový rozbor vzniku krouticího momentu od vlastní tíhy na hřídeli zatahování je na obr. 8.6.



Obr. 8.6 Silový rozbor vzniku krouticího momentu od vlastní tíhy na hřídeli zatahování přední podvozkové nohy

Úhel natočení podpěrné páky přední podvozkové nohy

$$\rho \in \langle -45,7^\circ - 60^\circ \rangle$$

Úhel natočení podvozkové nohy

$$\chi \in \langle 72,22^\circ - 186,4^\circ \rangle$$

Vzdálenost osy čepu spojení táhla a nohy od osy hlavního čepu nohy

$$a_{pc} = 0,097 \text{ [m]}$$

Vzdálenost těžiště podvozkové nohy od osy čepu spojení táhla a nohy

$$a_{pt} = 0,200 \text{ [m]}$$

Rameno podpěrné páky ovládání podvozku

$$a_{pp} = 0,155 \text{ [m]}$$

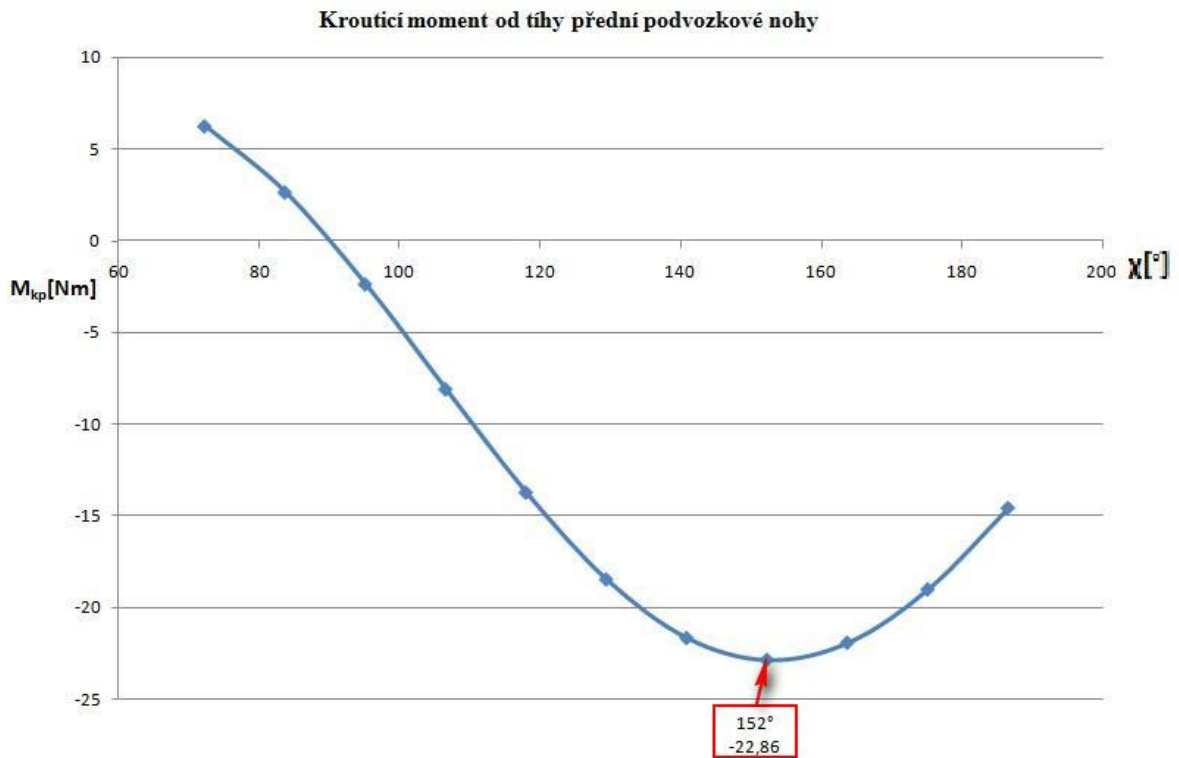
Hmotnost přední podvozkové nohy (s kolem)

$$m_{pn} = 6,3 \text{ [kg]}$$

Základní krouticí moment od tíhy přední podvozkové nohy

$$M_{Kp} = m_{pn} \cdot g \cdot \cos \rho \cdot \frac{(a_{pc} + a_{pt})}{a_{pc}} \cdot a_{pp} \cdot \cos \chi \quad (8.5)$$

Grafické znázornění výsledných momentů pro různé úhly natočení podvozkové nohy je na obr. 8.7.



Obr. 8.7 Krouticí moment od tíhy přední podvozkové nohy v závislosti na úhlu natočení podvozkové nohy

Maximální krouticí moment od tíhy přední podvozkové nohy při zatahování

$$M_{Kpm} = M_{Kp152} = 22,86 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Absolutní maximální krouticí moment od tíhy přední podvozkové nohy

$$M_{Kp \max} = M_{Kp152} \cdot 4 = 22,86 \cdot 4 = 91,44 \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (8.6)$$

8.3 Návrh a kontrola ozubeného soukolí zatahování kol

Ozubený převod se skládá z pastorku a hřebene. Pro výpočet bylo místo hřebene počítáno s kolem o počtu zubů $z_2 = 10^5$ [-]. Ozubená kola jsou navržena na maximální zatížení od pozemních sil, které na ně působí při přistání. Při přistání letadla jsou kola zablokována pomocí ozubeného hřebenu a zabraňují tak zazunutí podvozkových noh. Zatížení má výrazně rázový charakter, proto je volena vyšší minimální přípustná bezpečnost $k_0=2,0$ [-]. Návrh a kontrola ozubení byly provedeny pomocí katedrálních programů Geometrie [19] a ČSN [18].

8.3.1 Návrh a kontrola ozubeného soukolí pohonu předního podvozku

Ozubené kolo předního podvozku je zatěžováno maximálním krouticím momentem při dodatečném zatížení dozadu $M_{k4}=727[\text{N}\cdot\text{m}]$ (kap. 8.2.1). Materiálem ozubeného kola je ocel 14 220. Tab. 8.1 ukazuje geometrické parametry ozubení. Obr. 8.8 zobrazuje výsledky pevnostní kontroly.

OHYB				DOTYK			
σ_{F1}	= 147.7	σ_{F2}	= 92.3	σ_{H1}	= 627.7	σ_{H2}	= 627.7
σ_{FP1}	= 700.0	σ_{FP2}	= 700.0	σ_{HP1}	= 1270.0	σ_{HP2}	= 1270.0
S_{F1}	= 4.739	S_{F2}	= 7.584	S_{H1}	= 2.023	S_{H2}	= 2.023
σ_{Fmax1}	= 295.5	σ_{Fmax2}	= 184.6	σ_{Hmax1}	= 887.7	σ_{Hmax2}	= 887.7
σ_{FPmax1}	= 1400.0	σ_{FPmax2}	= 1400.0	σ_{HPmax1}	= 2600.0	σ_{HPmax2}	= 2600.0
K_F	= 1.212	K_{Fv}	= 1.000	σ_{HO1}	= 570.1	σ_{HO2}	= 570.1
$K_{F\alpha}$	= 1.200	$K_{F\beta}$	= 1.010	K_H	= 1.212	K_{Hv}	= 1.000
Y_ε	= 0.673	Y_β	= 1.000	$K_{H\alpha}$	= 1.200	$K_{H\beta}$	= 1.010
Y_{FS1}	= 3.630	Y_{FS2}	= 2.268	K_A	= 1.000	K_{AS}	= 2.000
Y_{Fa1}	= 2.229	Y_{Fa2}	= 1.921	Z_ε	= 0.877	Z_H	= 2.494
Y_{Sa1}	= 1.629	Y_{Sa2}	= 1.180	Z_{R1}	= 1.000	Z_{R2}	= 1.000
				Z_E	= 191.646		

Obr. 8.8 Výsledky kontroly ozubení pohonu předního podvozku

Výsledná bezpečnost soukolí je zcela vyhovující.

Tab. 8.1 Geometrické parametry ozubení pohonu předního podvozku

	Rozměr	PASTOREK		KOLO
Typ ozubení		Vnější		Vnější
Převodový poměr	u	[-]	3703.704	
Počet zubů	z	[-]	27	100000
Počet zubů náhradního kola	z_n	[-]	27.000	100000.000
Normální modul	m_n	[mm]	6.000	
Čelní modul	m_t	[mm]	6.000	
Úhel sklonu zubu roztečný	β	[°]	0	
Úhel sklonu zubu základní	β_b	[°]	0	
Úhel profilu čelní	α_t	[°]	20.00000	
Úhel záběru čelní	α_{tw}	[°]	20.00126	
Osová vzdálenost pracovní	a_w	[mm]	300083.39993	
Osová vzdálenost roztečná	a	[mm]	300081.00000	
Jednotková korekce	x	[-]	0.36244	0.03756
Hodnota posunutí profilu	$x \cdot m_n$	[mm]	2.17463	0.22537
Součet jednotkových korekcí	x_Σ	[-]	0.40000	
Jednotkové přisunutí kol	Δy	[-]	0.00001	
Průměr patní kružnice	d_f	[mm]	151.34925	599985.45075
základní kružnice	d_b	[mm]	152.23020	563815.57247
kr.začátku evolventy	d_L	[mm]	155.77425	599988.45197
valivé kružnice	d_w	[mm]	162.00130	600004.79857
roztečné kružnice	d	[mm]	162.00000	600000.00000
hlavové kružnice	d_a	[mm]	178.34911	600012.45061
Tloušťka zubu na patní kružnici	s_f	[mm]	---	14.88349
základní kružnici	s_b	[mm]	12.61282	8412.33428
začátku evolventy	s_L	[mm]	12.39015	13.79140
valivé kružnici	s_w	[mm]	11.00739	7.84231
roztečné kružnici	s	[mm]	11.00778	9.58884
hlavové kružnici	s_a	[mm]	3.65350	5.05694
Šířka mezery na valivé kružnici	e_w	[mm]	7.84231	11.00740
Výška paty	h_f	[mm]	5.32537	7.27463
hlavy	h_a	[mm]	8.17456	6.22530
zubu	h	[mm]	13.49993	13.49993
Přídavná změna výšky hlavy zubu		[mm]	0	0
Společná šířka kol	b	[mm]	25.000	
Délka evolventy	ev	[mm]	12.38714	12.76942
Měrný skluz na patě		[-]	-0.67725	-0.67725
Měrný skluz na hlavě		[-]	0.40379	0.40379
Poměr b/d	Ψ_d	[-]	0.154	0.000
Poměr b/m_n	Ψ_m	[-]	4.167	
Součinitel trvání záběru profilu	ε_α	[-]	1.69033	
Součinitel trvání záběru krokem	ε_β	[-]	0	
Součinitel trvání záběru celkový	ε_γ	[-]	1.69033	
Délka dotyku 1 páru zubů	L_{pmax}	[mm]	25.00000	
Celková délka dotyku minim.	$L_{\Sigma min}$	[mm]	25.00000	
Celková délka dotyku maxim.	$L_{\Sigma max}$	[mm]	50.00000	
Čelní rozteč	p_t	[mm]	18.84956	
Čelní rozteč základní	p_{tb}	[mm]	17.71279	
Kontrolní rozměr přes zuby	M	[mm]	65.75119	205219.12847
Počet měřených zubů	z'	[-]	4	11112
Minimální šířka kola pro měření	b'	[mm]	---	---
Měřená roztečná tloušťka zubu	s'	[mm]	10.99931	9.58884
Měřeno ve výšce (od hlavy)	v	[mm]	8.36148	6.22534
Poměrná výška hlavy profilu	h_a^*	[-]	1.00000	1.00000
Poměrná hlavová vůle profilu	c^*	[-]	0.25000	0.25000
Poměrný rádius paty profilu	ρ_f^*	[-]	0.38000	0.38000
Úhel profilu	α_n	[°]	20.00000	

8.3.1 Návrh a kontrola ozubeného soukolí pohonu zadního podvozku

Ozubené kolo zadního podvozku je zatěžováno maximálním krouticím momentem při brždění $M_m=335,7 \text{ [N}\cdot\text{m]}$ (kap. 8.2.1). Materiálem ozubeného kola je ocel 14 220. Z důvodu unifikace hřebene byl volen shodný modul a šířka ozubení, jako při návrhu soukolí pohonu předního podvozku. Tab. 8.2 ukazuje geometrické parametry ozubení. Obr. 8.9 zobrazuje výsledky pevnostní kontroly.

OHYB				DOTYK			
σ_{F1}	= 105.2	σ_{F2}	= 56.6	σ_{H1}	= 606.2	σ_{H2}	= 606.2
σ_{FP1}	= 700.0	σ_{FP2}	= 700.0	σ_{HP1}	= 1270.0	σ_{HP2}	= 1270.0
S_{F1}	= 6.655	S_{F2}	= 12.376	S_{H1}	= 2.095	S_{H2}	= 2.095
σ_{Fmax1}	= 210.4	σ_{Fmax2}	= 113.1	σ_{Hmax1}	= 857.3	σ_{Hmax2}	= 857.3
σ_{FPmax1}	= 1400.0	σ_{FPmax2}	= 1400.0	σ_{HPmax1}	= 2600.0	σ_{HPmax2}	= 2600.0
K_F	= 1.212	K_{Fv}	= 1.000	σ_{HO1}	= 550.6	σ_{HO2}	= 550.6
$K_{F\alpha}$	= 1.200	$K_{F\beta}$	= 1.010	K_H	= 1.212	K_{Hv}	= 1.000
Y_ϵ	= 0.673	Y_β	= 1.000	$K_{H\alpha}$	= 1.200	$K_{H\beta}$	= 1.010
Y_{FS1}	= 3.938	Y_{FS2}	= 2.118	K_A	= 1.000	K_{AS}	= 2.000
Y_{Fa1}	= 2.524	Y_{Fa2}	= 1.999	Z_ϵ	= 0.878	Z_H	= 2.494
Y_{Sa1}	= 1.560	Y_{Sa2}	= 1.059	Z_{R1}	= 1.000	Z_{R2}	= 1.000
				Z_E	= 191.646		

Obr. 8.9 Výsledky kontroly ozubení pohonu zadního podvozku

Výsledná bezpečnost soukolí je zcela vyhovující.

Tab. 8.2 Geometrické parametry ozubení pohonu zadního podvozku

	<i>Rozměr</i>	<i>PASTOREK</i>		<i>KOLO</i>
Typ ozubení		Vnější		Vnější
Převodový poměr u	[-]		5263.158	
Počet zubů z	[-]	19		100000
Počet zubů náhradního kola z_n	[-]	19.000		100000.000
Normální modul m_n	[mm]		6.000	
Čelní modul m_t	[mm]		6.000	
Úhel sklonu zubu roztečný β	[°]		0	
Úhel sklonu zubu základní β_b	[°]		0	
Úhel profilu čelní α_t	[°]		20.00000	
Úhel záběru čelní α_{tw}	[°]		20.00126	
Osová vzdálenost pracovní a_w	[mm]		300059.39992	
Osová vzdálenost roztečná a	[mm]		300057.00000	
Jednotková korekce x	[-]	0.45702		-0.05702
Hodnota posunutí profilu $x \cdot m_n$	[mm]	2.74214		-0.34214
Součet jednotkových korekcí x_Σ	[-]		0.40000	
Jednotkové přisunutí kol Δy	[-]		0.00001	
Průměr patní kružnice d_f	[mm]	104.48429		599984.31571
základní kružnice d_b	[mm]	107.12496		563815.57247
kr.začátku evolventy d_L	[mm]	108.96509		599987.31711
valivé kružnice d_w	[mm]	114.00091		600004.79893
roztečné kružnice d	[mm]	114.00000		600000.00000
hlavové kružnice d_a	[mm]	131.48413		600011.31555
Tloušťka zubu na patní kružnici s_f	[mm]	---		14.88338
základní kružnici s_b	[mm]	12.32876		8411.94608
začátku evolventy s_L	[mm]	12.31102		13.79125
valivé kružnici s_w	[mm]	11.42066		7.42906
roztečné kružnici s	[mm]	11.42090		9.17572
hlavové kružnici s_a	[mm]	2.88345		5.05699
Šířka mezery na valivé kružnici e_w	[mm]	7.42905		11.42065
Výška paty h_f	[mm]	4.75786		7.84214
hlavy h_a	[mm]	8.74207		5.65778
zubu h	[mm]	13.49992		13.49992
Přídavná změna výšky hlavy zubu	[mm]	0		0
Společná šířka kol b	[mm]		25.000	
Délka evolventy ev	[mm]	12.63638		12.76929
Měrný skluz na patě	[-]	-0.95554		-0.95554
Měrný skluz na hlavě	[-]	0.48863		0.48863
Poměr b/d Ψ_d	[-]	0.219		0.000
Poměr b/m_n Ψ_m	[-]		4.167	
Součinitel trvání záběru profilu ε_α	[-]		1.58916	
Součinitel trvání záběru krokem ε_β	[-]		0	
Součinitel trvání záběru celkový ε_γ	[-]		1.58916	
Délka dotyku 1 páru zubů L_{pmax}	[mm]		25.00000	
Celková délka dotyku minim. $L_{\Sigma min}$	[mm]		25.00000	
Celková délka dotyku maxim. $L_{\Sigma max}$	[mm]		50.00000	
Čelní rozteč p_t	[mm]		18.84956	
Čelní rozteč základní p_{tb}	[mm]		17.71279	
Kontrolní rozměr přes zuby M	[mm]	65.46713		205218.74026
Počet měřených zubů z'	[-]	4		11112
Minimální šířka kola pro měření b'	[mm]	---		---
Měřená roztečná tloušťka zubu s'	[mm]	11.40180		9.17572
Měřeno ve výšce (od hlavy) v	[mm]	9.02787		5.65781
Poměrná výška hlavy profilu h_a^*	[-]	1.00000		1.00000
Poměrná hlavová vůle profilu c^*	[-]	0.25000		0.25000
Poměrný rádius paty profilu ρ_f^*	[-]	0.38000		0.38000
Úhel profilu α_n	[°]		20.00000	

8.4 Návrh a kontrola pohybového šroubu a matice pohonu zatahování podvozku

Pohybové šrouby pohonu zatahování jsou navrženy všechny 3 shodně pro maximální zatížení, které působí na pohon předního podvozku. Šroub v sestavě zatahování předního podvozku je namáhán největší silou. Jedná se o tahovou sílu, při zatížení předního podvozku doplňkovým zatížením dozadu. Návrh závitu a matice tedy zohledňuje toto namáhání. Kontrola závitu je provedena podle [9]. Minimální součinitel bezpečnosti je stanoven $k_c=1,5[-]$.

8.4.1 Návrh a kontrola závitu šroubu a matice

Určení osově síly ve šroubu

$$F_{OT} = \frac{2 \cdot M_{K4}}{d_{rP}} = \frac{2 \cdot 727}{0,162} = 8975 [\text{N}] \quad (8.7)$$

kde d_r = průměr roztečné kružnice ozubeného kola zatahování předního podvozku

Návrh rozměrů pohybového šroubu

Materiál : 11 523 $R_e=330$ [MPa] podle [10]

jednoduchý závit $\Rightarrow \beta_s = 1,3$

$$d_3 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{\beta_s \cdot k_s \cdot F_{OT}}{\pi \cdot R_e}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,3 \cdot 1,5 \cdot 8975}{\pi \cdot 330}} = 16,88 \text{ mm} \quad (8.8)$$

volím závit **TR24 x 3** $\Rightarrow P = P_h = 3,0$ [10] , parametry závitu jsou v tabulce 8.3

Tab 8.3 Parametry závitu pohybového šroubu

d	D	d₂	d₃	D₁	e
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
24	24,5	22,5	20,5	21,0	0,25

Pozn. : Šroub je navržen jako dutý, průměr vrtání je $d_c=15$ [mm].

Pevnostní kontrola šroubu

$$\sigma_{RED} = \sqrt{\sigma_d^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq \sigma_D = \frac{Re}{k_s} \quad (8.9)$$

$$\sigma_d = \frac{F_{OT}}{\frac{\pi \cdot (d_3^2 - d_C^2)}{4}} = \frac{8975}{\frac{\pi \cdot (20,500^2 - 15^2)}{4}} = 58,53 [\text{MPa}] \quad (8.10)$$

$$\gamma = \arctg \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \arctg \frac{3}{\pi \cdot 22,500} = 2,430^\circ \quad (8.11)$$

Volím součinitel smykového tření na závitu $f_z = 0,150$ podle [9]

$$\varphi' = \arctg \frac{f_z}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \arctg \frac{0,150}{\cos 15} = 8,83^\circ \quad (8.12)$$

$$\tau = \frac{M_R}{W_K} = \frac{R_x \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} = \frac{F_O \cdot \tg(\gamma + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2}}{\frac{\pi \cdot d_3^3}{16}} \quad (8.13)$$

$$\tau = \frac{8975 \cdot \tg(2,43 + 8,827) \cdot \frac{22,500}{2}}{\frac{\pi \cdot 20,500^3}{16}} = 11,88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{RED} = \sqrt{58,52^2 + 4 \cdot 11,88^2} = 63,21 [\text{MPa}] \quad (8.14)$$

$$k_s = \frac{Re}{\sigma_{RED}} = \frac{330}{63,21} = 5,22 [-] \quad (8.15)$$

$$k_s \leq k_c \Rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Výpočet výšky matice

$$H_1 = \frac{d - D_1}{2} = \frac{24,000 - 21,000}{2} = 1,5 \text{ mm} \quad (8.16)$$

Volím měrný tlak v závitech pro ocel $p_D = 20 \text{ MPa}$ podle [9]

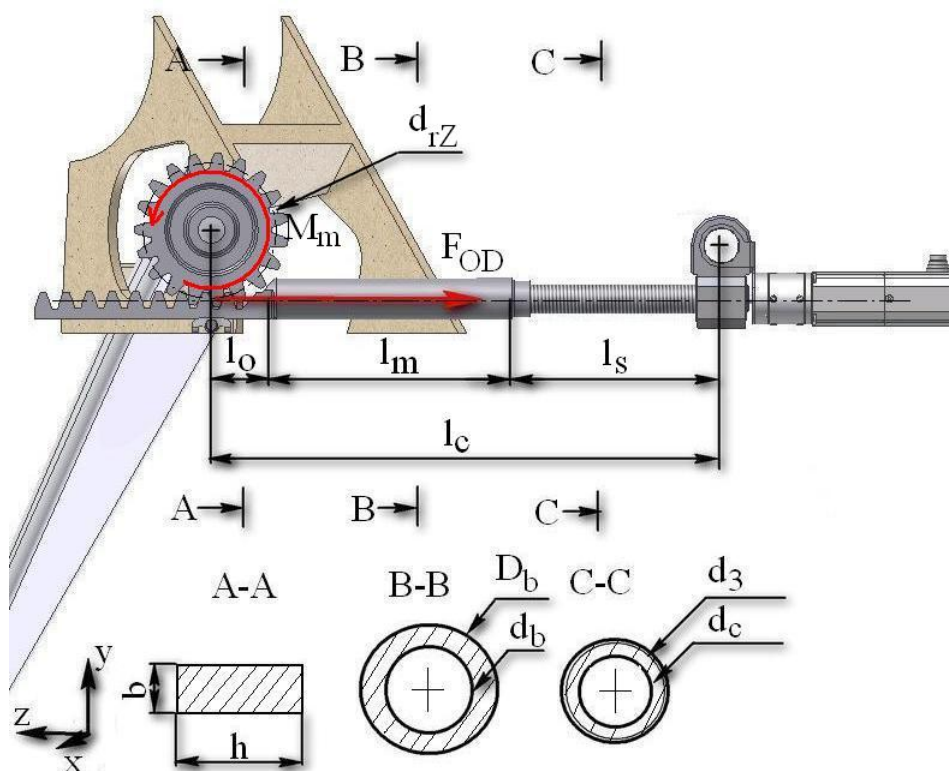
$$z \geq \frac{F_O}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot p_D} = \frac{8975}{\pi \cdot 22,500 \cdot 1,5 \cdot 20} = 4,23 \Rightarrow z = 5 \quad (8.17)$$

$$h_m = z \cdot P = 5 \cdot 3 = 15 \text{ mm} \quad (8.18)$$

Matice bude delší z důvodu odolnosti spojení vůči zalamování.

8.4.2 Kontrola pohybového šroubu a matice pohonu zatahování podvozku na vzpěr

Protože šroub v sestavě zatahování hlavního podvozku je namáhán tlakovou silou, je nutné zkontrolovat sestavu šroubu a matice na vzpěr (maticí se rozumí celý svařenec trubky s vnitřním závitem a ozubeného hřebene). Kontrola na vzpěr je provedena pro síly, vycházející ze zatížení zadního podvozku při brždění. Protože jsou v sestavě použity 3 různé profily, je nutné sestavu rozdělit na části podle příslušných profilů. Rozdělení sestavy na úseky a použité průřezy jsou na obr. 8.10. Zobrazené délky a průměry, potřebné pro výpočet uvádí tab. 8.4.



Obr. 8.10 Rozdělení soustavy šroubu a matice zatahování na úseky podle průřezů

Tab. 8.4 Rozměrové parametry průřezů sestavy šroubu a matice zatahování podvozku

	[mm]		[mm]
l_o	49	h	8,5
l_m	211	b	30
l_s	156	D_b	34
l_c	416	d_b	26
d_{rz}	114	d_3	20,5
		d_c	15

Momenty a poloměry setrvačnosti průřezů včetně vzorců pro výpočet jsou zvedeny v tab. 8.5.

Tab. 8.5 Momenty a poloměry setrvačnosti jednotlivých průřezů

	Průřez		
	A	B	C
J [mm⁴]	$J_{\min} = \frac{b \cdot h^3}{12}$	$J_{\min} = \frac{\pi \cdot (D_b^4 - d_b^4)}{64}$	$J_{\min} = \frac{\pi \cdot (d_3^4 - d_c^4)}{64}$
	1535,31	43165,48	6184,28
i [mm]	$i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{b \cdot h}}$	$i_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot J_{\min}}{\pi \cdot (D_b^2 - d_b^2)}}$	$i_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot J_{\min}}{\pi \cdot (d_3^2 - d_c^2)}}$
	2,45	10,70	6,35

Nejmenší poloměr setrvačnosti $i=2,45$ [mm] je v průřezu A, sestava bude tedy zjednodušeně kontrolována, jakoby v celé délce l_c byl tento průřez. Uložení sestavy je na obou koncích kloubové, proto není nutný přepoččet redukované délky.

V sestavě jsou použity 2 materiály. Na šroub a matici je použita ocel 11523 ($R_e=330$ [MPa]), zatímco na ozubený hřeben je použita ocel 14220 ($R_e=590$ [MPa]). Ve výpočtu bude uvažován materiál s nižší pevností, tedy 11523.

Určení osových sil ve šroubu

$$F_{OD} = \frac{2 \cdot M_m}{d_{rZ}} = \frac{2 \cdot 335,7}{0,114} = 5890 \text{ [N]} \quad (8.7)$$

Štíhlostní poměr

$$\lambda = \frac{l_c}{i_{\min}} = \frac{416}{2,45} = 169,80 \quad (8.8)$$

Výpočet meze úměrnosti

$$\sigma_u = 0,8 \cdot R_e = 0,8 \cdot 330 = 264 \text{ [MPa]} \quad (8.9)$$

Výpočet kritické mezní štíhlosti

$$\lambda_{kr} = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_u}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{264}} = 88,60 \quad (8.10)$$

$$169,80 \geq 88,60 \Rightarrow \text{Postup podle Eulera}$$

Výpočet kritického napětí

$$\sigma_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5}{169,80^2} = 71,89 [\text{MPa}] \quad (8.11)$$

Napětí v sestavě zatahování

$$\sigma_s = \frac{F_{OD}}{S_{\min}} = \frac{F_{OD}}{b \cdot h} = \frac{5890}{30 \cdot 8,5} = 23,10 [\text{MPa}] \quad (8.12)$$

Kontrola bezpečnosti ve vzpěru

$$k_{vz} = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_s} = \frac{71,89}{23,10} = 3,11 [-] \quad (8.13)$$

Výsledná bezpečnost není příliš vysoká, vzhledem k přijatým zjednodušením, které jsou výrazně na straně bezpečnosti však lze tento výsledek považovat za vyhovující.

8.4.3 Kontrola matice a ozubeného hřebene pohonu zatahování podvozku na tah

Tahová síla v sestavě pohonu zatahování je největší při zatížení předního podvozku doplňkovým zatížením dozadu. Na tuto sílu je dimenzován pohybový šroub (viz. kap. 8.4.1). Kontrolu matice je nutné provést, protože ve své prodloužené části má zeslabený průřez. Značně slabý průřez má také ozubený hřeben pohonu zatahování.

Kontrola bude provedena na průřezích A a B podle kap. 8.4.2 (obr. 8.10).

Kontrola průřezu A

materiál: 14220 $R_e=590$ [MPa] [10]

$$\sigma_A = \frac{F_{OT}}{b \cdot h} = \frac{8975}{30 \cdot 8,5} = 35,20 [\text{MPa}] \quad (8.14)$$

$$k_A = \frac{R_e}{\sigma_A} = \frac{590}{35,2} = 16,76 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (8.15)$$

Kontrola průřezu B

materiál: 11523 $R_e=330$ [MPa] [10]

$$\sigma_B = \frac{4 \cdot F_{OT}}{\pi \cdot (D_b^2 - d_b^2)} = \frac{4 \cdot 8975}{\pi \cdot (34^2 - 26^2)} = 23,81 [\text{MPa}] \quad (8.16)$$

$$k_B = \frac{R_e}{\sigma_A} = \frac{330}{23,81} = 13,86 \Rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (8.17)$$

8.5 Návrh elektromotoru pohonu zatahování podvozku

Elektromotory pohonu zatahování jsou navrženy všechny 3 shodně pro maximální zatížení, které působí na pohon předního podvozku prostřednictvím krouticího momentu na ozubeném kole zatahování předního podvozku (kap. 8.2) $M_{Kpm} = M_{Kp175} = 29,3 [\text{N} \cdot \text{m}]$. Elektromotor musí být volen tak, aby zajistil vysunutí podvozku do 10 vteřin podle doporučení [11].

Určení pohybové osové síly ve šroubu

$$F_{OP} = \frac{2 \cdot M_{KP152}}{d_{rP}} = \frac{2 \cdot 22,86}{0,162} = 282 [\text{N}] \quad (8.18)$$

Výpočet třecího momentu v závitech

$$M_{tz} = F_o \cdot \text{tg}(\gamma + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} \quad (8.19)$$

$$M_{tz} = 282 \cdot \text{tg}(2,43 + 8,827) \cdot \frac{22,5}{2} = 631,4 [\text{N} \cdot \text{mm}]$$

Výpočet maximálního krouticího momentu žádaného od elektromotoru

účinnost ložisek $\eta_{loz}=0,9$ [_]

$$M_{cel} = \frac{M_{tz}}{\eta_{loz}} = \frac{631,4}{0,9} = 701,6 [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (8.20)$$

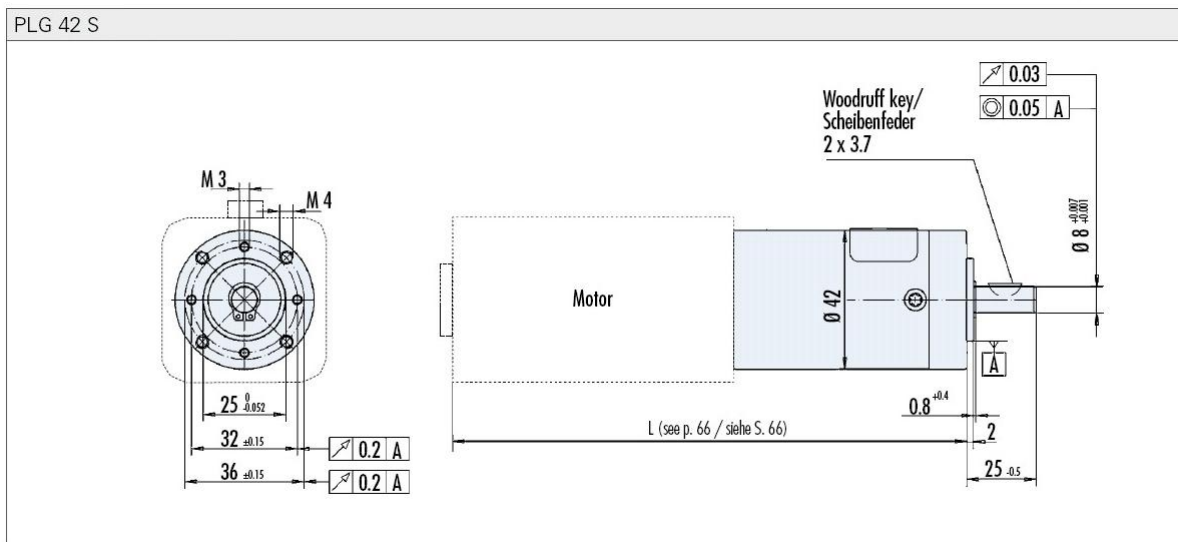
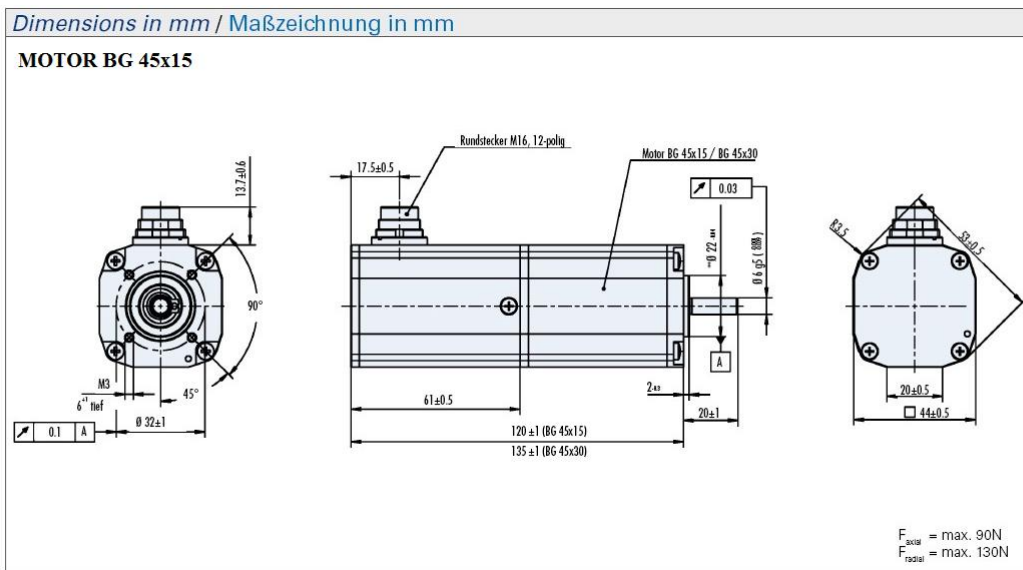
dráha vysunutí matice

$$s_{mat} = \frac{\pi \cdot d_{rP} \cdot \Delta\chi}{360} = \frac{\pi \cdot 162 \cdot 114,18}{360} = 161,4 [\text{mm}] \quad (8.21)$$

potřebné otáčky elektromotoru

$$n_{\min} = 60 \cdot \frac{s_{mat}}{t \cdot P_h} = 60 \cdot \frac{161,4}{10 \cdot 3} = 323 [\text{ot/min}] \quad (8.22)$$

Volím motor BG 45x15 SI s převodovkou PLG 42S. Rozměry motoru a převodovky jsou na obr. 8.11. Základní technická data motoru a převodovky jsou uvedeny v tab. 8.6 [12].



Obr. 8.11 Rozměry motoru a převodovky pohonu zatahování podvozků

Tab 8.6 Základní technická data motoru a převodovky

Motor BG 45x15 SI			Redukční převodovka PLG 42 2		
Napětí	[V] DC	12	Převod	[_]	8:1
Trvalé otáčky	[ot/min]	3450	Počet stupňů	[_]	1
Trvalý krouticí moment	[Nm]	0,132	Účinnost	[_]	0,9
Záběrový moment	[Nm]	0,440	Přenesitelný krouticí moment	[Nm]	3,5
Hmotnost	[kg]	0,5	Hmotnost	[kg]	0,27

Výsledné parametry motoru s převodovkou

$$M_{poh} = 0,13 \cdot 8 \cdot 0,9 = 0,936 \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (8.23)$$

$$n_{poh} = \frac{3450}{8} = 431,25 \text{ [ot/min]} \quad (8.24)$$

Kontrola elektromotoru s převodovkou

$$M_{poh} \geq M_{cel}$$

$$0,936 > 0,702$$

$$n_{poh} \geq n_{min}$$

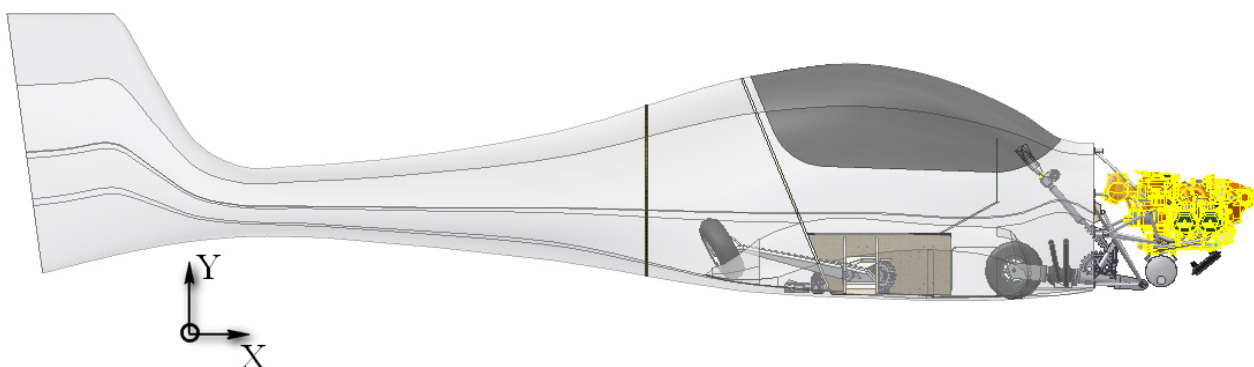
$$431,25 > 323$$

POHONNÁ SESTAVA VYHOVUJE

9 Závěr

Navržený zatahovací podvozek využívá zcela originální koncepci pohonu zatahování podvozkových noh. Pro případnou realizaci zástavby navrženého podvozku do letadla je třeba vyřešit konstrukční změny v systému pedálového řízení a konstrukčně upravit spodní část motorového lože. Vzhledem k tomu, že přední i zadní podvozkové nohy se zatahují směrem dozadu, bude zřejmě potřeba navrhnout systém automatického vyvážení při změně konfigurace podvozku, aby se tak potlačil vliv posunutí těžiště letadla. Pro získání osvědčení o způsobilosti k provozu je dále nutné absolvovat shazovací zkoušku z výšky vypočtené v kapitole. 5.3.

Instalací nového zatahovatelného přistávacího zařízení klesne užitečná hmotnost letadla o zhruba 16 kg, což je rozdíl mezi hmotností původního pevného přistávacího zařízení a nového zatahovatelného přistávacího zařízení. Získá se tím však výhoda snížení spotřeby pohonných hmot a tedy snížení provozních nákladů a zároveň se dá očekávat mírné zvýšení letových výkonů. Celkový průhledový pohled na zatažený podvozek v trupu letadla je na obr. 9.1.



Obr. 9.1 Průhledový pohled na zatažený podvozek v trupu letadla

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Květoslavu Kalábovi, Ph.D., konzultantovi Ing. Ondřeji Hanákovi, týmu z fy. ATEC v.o.s. Ing. Janu Fraňkovi a Petru Volejníkovi a doc. Ing. Zdeňku Foltovi Ph.D. za cenné rady, vedení a poskytnutí hodnotných materiálů a dokumentace.

Seznam použité literatury

- [1] ATEC v.o.s., Opolanská 350, 289 07 Libice nad Cidlinou. *ATEC 321 FAETA Letová a provozní příručka*. Libice nad Cidlinou, Česká republika : ATEC v.o.s., 2008.
- [2] Jirásek, Vojtěch. *Návrh hydraulického systému*. Praha : Výpočetní a informační centrum ČVUT, 2007.
- [3] www.uljih.cz. [Online] [Citace: 28. 02 2009.] <http://www.uljih.cz/obr.php?ID=523>.
- [4] Letecká amatérská asociace ČR, Ke Kablu 289, Praha 10. *UL 2 - I. Část, Požadavky letové způsobilosti SLZ Ultralehké letouny řízené aerodynamicky, upravené znění*. Praha : Letecká amatérská asociace ČR, 2002.
- [5] Olšanský, Oldřich a Matějček, Jiří. *Konstrukce a výpočet ultralehkých letounů Příručka pro amatérské stavitele*. místo neznámé : Knižnice Letecké amatérské asociace, 1999.
- [6] Lenert, Jiří. *Mechanika kompozitních materiálů*. ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0026-8.
- [7] prof. ing. Dejl Zdeněk, CSc. *Konstrukce strojů a zařízení I. -spojovací části strojů*. Ostrava : Montanex, 2000. ISBN-80-7225-018-3.
- [8] SKF. Interactive engineering catalogue. [Online] [Citace: 30. březen 2009.] <http://www.skf.com/skf/productcatalogue/calculationsFilter?lang=en&newlink=&prodid=&action=PlainCalc3>.
- [9] Kaláb, květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře. Části spojovací*. Ostrava : VŠB-TU, 2007. ISBN 978-80-248-1290-8.
- [10] Ing. Leinveber, Ing. Vávra. *Strojnické tabulky pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Úvaly : ALBRA, 2003. 80-86490-74-2.
- [11] N., Currey. *Aircraft landing gear design:Principles and practices*. místo neznámé : AIAA, 1988. ISBN 0930403-41-X.
- [12] Alcatel-Lucent Deutschland AG. *Brushless DC-Motors Katalog*. Bonndorf/Schwarzwald : autor neznámý, 2009.
- [13] Harašta, ivan, Procházka, Jiří a Rečka, Rudolf a kolektiv. *Učebnice pilota*. Cheb : Svět Křídla, 2003. ISBN - 80-85280-89-2.
- [14] Mertl, Vlastimil. *Konstrukce a projektování letadel*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, FS, 2000. ISBN 80-214-1789-7.
- [15] Kříž, Rudolf a Vávra, Pavel. *Strojírenská příručka svazek 4*. Brno : Scientia, 1994. ISBN 80-85827-1.
- [16] —. *Strojírenská příručka svazek 5*. Brno : Scientia, 1994. ISBN 8085827-59-X.

Použitý software

- [17] AUTODESK, Inc. *Autodesk Inventor Professional 2009*, 3D parametrický strojírenský CAD
- [18] NĚMČEK, Miloš. *ČSN 01 4686*, verze 1.1,
Ostrava: VŠB – TUO, výpočtový program.
- [19] NĚMČEK, Miloš. *Geometrický výpočet ozubení*, verze 1.22,
Ostrava: VŠB – TUO, výpočtový program.

Seznam příloh

- 1. Statická charakteristika tuhosti pryžové pružiny
- 2. Výkres sestavy: Sestava hlavního podvozku č.v. LIN073-SNKIK02-00
- 3. Výkres sestavy: Přední podvozková noha č.v. LIN073-SNKIK02-01
- 4. Dílenský výkres: Držák pohonu č.v. LIN073-SNKIK02-02
- 5. Kompletní diplomová práce v elektronické podobě na CD médiu